



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE  
HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA  
RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE DIFERENTES  
ASFALTOS MEXICANOS CON LA INCORPORACIÓN  
DE ADITIVOS QUÍMICOS EMPLEADOS PARA LA  
ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS**

TESIS QUE PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRA EN INGENIERÍA EN  
INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS  
TERRESTRES PRESENTA:

**ING. MIRIAM OROZCO LÓPEZ**

**ASESOR: DR. JORGE ALARCÓN IBARRA**

**CO-ASESOR: DR. JULIO CÉSAR ORANTES AVÁLOS**



## DEDICATORIAS

### *A Dios:*

*Por estar conmigo en todo momento dándome las fuerzas para seguir adelante y muy en especial, por haber puesto en mi camino siempre a las personas indicadas dispuestas a brindarme su apoyo logrando cumplir esta meta tan importante en mi vida.*

### *A mis Padres:*

*Por su apoyo para que fuera posible que lograra esta meta en mi vida. En especial a mi madre Catalina López Pulido por el gran esfuerzo que ha hecho durante toda mi vida para apoyarme en cada una de las metas anteriores para llegar a esta.*

### *A mis hermanos:*

*Por su comprensión y apoyo en todo momento muy en especial a mis hermanas Lizza quien ha sido mi gran amuleto y mi ejemplo a seguir de paciencia fuerza y sabiduría, a mi hermana Deisy, por su gran apoyo incondicional.*

### *A la Dra. María Laura Eugenia Nava Ortiz:*

*A esta gran mujer, a quien debo el hecho de haber iniciado la carrera de Ing. Civil, ya que sin ella no hubiera sido posible siquiera la idea de estudiar una licenciatura, agradezco a Dios por haberla puesto en mi camino.*

*Al Dr. José Luís Ruíz Colina:*

*Por su gran apoyo en mi formación a lo largo de mi camino por la Licenciatura de Ingeniería Civil.*

*Al Sr. José de Jesús Bautista Álvarez:*

*Por ser quien me brindó la oportunidad de iniciar en el desempeño de la Ingeniería Civil y muy en especial por haber depositado su confianza en mí para llevar a cabo una tarea muy importante, que vino a cumplir mi gran sueño. Es un honor para mí colaborar en su equipo de trabajo, es una persona respetable y muy inteligente, siempre tienen una solución para cualquier situación que se le presente, está haciendo historia en nuestro Municipio.*

## AGRADECIMIENTOS

### *A mí Asesor:*

*Agradezco al Dr. Jorge Alarcón Ibarra por haberme brindado sus conocimientos y apoyo en todo momento en las etapas del presente trabajo.*

### *A Químikao, S.A. de C.V.:*

*A los colaboradores de la empresa por brindarme en todo momento su apoyo y conocimiento en la realización del presente trabajo.*

- Ing. Raúl Melitón Luna por su confianza deposita para llevar a cabo el análisis del aditivo químico.*
- Ing. José Luis Lara González por su gran apoyo incondicional para llevar a cabo esta investigación.*
- Ing. Álvaro Gutiérrez Muñiz, quien es el autor del aditivo químico que se analizó y todo el tiempo estuvo al pendiente resolviendo dudas y brindándome sus conocimientos.*
- Ing. Luis Enrique Ramírez e Ing. Raúl Terán Orozco Soto, por su gran apoyo en la elaboración de algunas pruebas de caracterización reológica y por su apoyo brindado en todo momento.*

### *A Hugo H. Talavera:*

*Por tu gran apoyo incondicional, has venido a ocupar un lugar muy importante en mi vida, siendo mi columna central, siempre dispuesto a brindarme tu apoyo en todo lo que necesito, gracias por todo lo que has logrado de mi TE AMO, y quiero estar siempre a tu lado.*



## ÍNDICE GENERAL

<b>DEDICATORÍAS</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>10</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>15</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 1.- ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS</b>	<b>21</b>
1.1. ASFALTOS	21
1.1.1. CEMENTOS ASFÁLTICOS	22
1.1.2. EMULSIONES ASFÁLTICAS	23
1.1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS SEGÚN SU GRADO PG	25
1.1.4. CEMENTOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS	29
1.2. MEZCLAS ASFÁLTICAS	31
1.2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	32
1.2.2. MATERIALES PÉTREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS	38
<b>CAPÍTULO 2.- MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS</b>	<b>43</b>
2.1. ESTADO DEL ARTE	44
2.2. VENTAJAS DE UTILIZAR MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS	46
2.3. ACUERDOS INTERNACIONALES SOBRE REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)	47
2.4. MÉXICO CAMPO FÉRTIL EN BONOS DE CARBONO	51
2.5. MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS EN MÉXICO	52
<b>CAPÍTULO 3.- CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LOS ASFALTOS ESTUDIADOS</b>	<b>54</b>
3.1. REFINERÍAS DE MÉXICO	55
3.2. ASFALTOS ESTUDIADOS	56
3.2.1. REFINERÍA TULA	56
3.2.2. REFINERÍA SALAMANCA	58
3.2.3. REFINERÍA SALINA CRUZ	60
3.3. CARTAS DE VISCOSIDAD VS TEMPERATURA DE LOS ASFALTOS ESTUDIADOS	61
3.4. DETERMINACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO A CORTO PLAZO	66
3.4.1. ELABORACIÓN DE LA PRUEBA	67
3.4.2. RESULTADOS	69
3.5. DETERMINACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO A LARGO PLAZO	70
3.5.1. ELABORACIÓN DE LA PRUEBA	71
3.5.2. RESULTADOS	74

3.6.	CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA	75
3.6.1.	ELABORACIÓN DE LA PRUEBA	76
3.6.2.	RESULTADOS	79
<b>CAPÍTULO 4.- CARACTERIZACIÓN DE LOS DIFERENTES ASFALTOS ESTUDIADOS MEDIANTE EL MÉTODO UCL®</b>		<b>91</b>
4.1.	ANTECEDENTES	92
4.2.	DESCRIPCIÓN DE LOS ANÁLISIS POR EL MÉTODO UCL®	95
4.2.1.	ANÁLISIS POR TEMPERATURA	95
4.2.2.	ANÁLISIS POR HUMEDAD	96
4.2.3.	ANÁLISIS POR ENVEJECIMIENTO	97
4.3.	MATERIALES EMPLEADOS	98
4.4.	FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS	100
4.5.	PRUEBA DE DESGASTE	110
4.6.	ANÁLISIS POR TEMPERATURA	112
4.6.1.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR TEMPERATURA EN ASFALTOS AC-20	113
4.6.2.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR TEMPERATURA EN ASFALTOS CON ADITIVO EVOTHERM	117
4.6.3.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR TEMPERATURA EN ASFALTOS CON ADITIVO QUIMIKAO	120
4.7.	ANÁLISIS POR HUMEDAD	123
4.7.1.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR HUMEDAD EN ASFALTOS AC-20	125
4.7.2.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR HUMEDAD EN ASFALTOS CON ADITIVO EVOTHERM	128
4.7.3.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR HUMEDAD EN ASFALTOS CON ADITIVO QUIMIKAO	131
4.8.	ANÁLISIS POR ENVEJECIMIENTO	134
4.8.1.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR ENVEJECIMIENTO EN ASFALTOS AC-20	136
4.8.2.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR ENVEJECIMIENTO EN ASFALTOS CON ADITIVO EVOTHERM	139
4.8.3.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR ENVEJECIMIENTO EN ASFALTOS CON ADITIVO QUIMIKAO	142
<b>CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>		<b>145</b>
5.1.	CARTAS DE VISCOSIDAD VS TEMPERATURA	145
5.2.	CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA	146
5.3.	ANÁLISIS POR TEMPERATURA MÉTODO UCL®	147
5.4.	ANÁLISIS POR HUMEDAD MÉTODO UCL®	157
5.5.	ANÁLISIS POR ENVEJECIMIENTO MÉTODO UCL®	167
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>176</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>177</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Clasificación de los materiales asfálticos.	21
<b>Tabla 1.2.</b> Clasificación de los cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60 °C.	22
<b>Tabla 1.3.</b> Clasificación de las emulsiones asfálticas.	24
<b>Tabla 1.4.</b> Clasificación de los asfaltos rebajados.	25
<b>Tabla 1.5.</b> Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad del tránsito esperado y con la velocidad de operación.	27
<b>Tabla 1.6.</b> Requisitos de calidad para cementos asfálticos Grado PG.	28
<b>Tabla 1.7.</b> Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad del tránsito esperado y con la velocidad de operación.	29
<b>Tabla 1.8.</b> Mezclas asfálticas según los diferentes parámetros de clasificación.	38
<b>Tabla 2.1.</b> Mezclas Templadas producidas en la planta de asfalto del Distrito Federal.	53
<b>Tabla 3.1.</b> Resultados del ensayo RTFO en asfaltos AC-20.	70
<b>Tabla 3.2.</b> Resultados del ensayo RTFO en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.	70
<b>Tabla 3.3.</b> Resultados del ensayo PAV en asfaltos AC-20.	74
<b>Tabla 3.4.</b> Resultados del ensayo PAV en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.	74
<b>Tabla 3.5.</b> Resultados del ensayo DSR en asfalto AC-20 de Salamanca.	79
<b>Tabla 3.6.</b> Resultados del ensayo DSR en asfalto AC-20 de Tula.	81
<b>Tabla 3.7.</b> Resultados del ensayo DSR en asfalto AC-20 de Salina Cruz.	83
<b>Tabla 3.8.</b> Resultados del ensayo DSR en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.	85
<b>Tabla 3.9.</b> Resultados del ensayo DSR en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.	87
<b>Tabla 3.10.</b> Resultados del ensayo DSR en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.	89
<b>Tabla 4.1.</b> Temperaturas y aparato de ensayo de las probetas Marshall.	95
<b>Tabla 4.2.</b> Parámetros de análisis por el Método UCL®.	100
<b>Tabla 4.3.</b> Probetas fabricadas en cada fase por asfalto.	101
<b>Tabla 4.4.</b> Resultados de la prueba por temperatura en asfalto AC-20 de Salamanca.	113
<b>Tabla 4.5.</b> Resultados de la prueba por temperatura en asfalto AC-20 de Tula.	115
<b>Tabla 4.6.</b> Resultados de la prueba por temperatura en asfalto AC-20 de Salina Cruz.	116
<b>Tabla 4.7.</b> Resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.	117
<b>Tabla 4.8.</b> Resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.	118
<b>Tabla 4.9.</b> Resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.	119
<b>Tabla 4.10.</b> Resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.	120
<b>Tabla 4.11.</b> Resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.	121
<b>Tabla 4.12.</b> Resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.	122
<b>Tabla 4.13.</b> Resultados de la prueba por humedad en asfalto AC-20 de Salamanca.	125

<b>Tabla 4.14.</b> Resultados de la prueba por humedad en asfalto AC-20 de Tula.	126
<b>Tabla 4.15.</b> Resultados de la prueba por humedad en asfalto AC-20 de Salina Cruz.	127
<b>Tabla 4.16.</b> Resultados de la prueba por humedad en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.	128
<b>Tabla 4.17.</b> Resultados de la prueba por humedad en asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.	129
<b>Tabla 4.18.</b> Resultados de la prueba por humedad en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.	130
<b>Tabla 4.19.</b> Resultados de la prueba por humedad en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.	131
<b>Tabla 4.20.</b> Resultados de la prueba por humedad en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.	132
<b>Tabla 4.21.</b> Resultados de la prueba por humedad en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.	133
<b>Tabla 4.22.</b> Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto AC-20 de Salamanca.	136
<b>Tabla 4.23.</b> Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto AC-20 de Tula.	137
<b>Tabla 4.24.</b> Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto AC-20 de Salina Cruz.	138
<b>Tabla 4.25.</b> Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.	139
<b>Tabla 4.26.</b> Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.	140
<b>Tabla 4.27.</b> Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.	141
<b>Tabla 4.28.</b> Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.	142
<b>Tabla 4.29.</b> Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.	143
<b>Tabla 4.30.</b> Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.	144
<b>Tabla 5.1.</b> Resumen de resultados del ensayo DSR en asfaltos AC-20.	146
<b>Tabla 5.2.</b> Resumen de resultados del ensayo DSR en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.	146
<b>Tabla 5.3.</b> Resumen de resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Salamanca.	147
<b>Tabla 5.4.</b> Resumen de resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Tula.	148
<b>Tabla 5.5.</b> Resumen de resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Salina Cruz.	149
<b>Tabla 5.6.</b> Resumen de resultados de la prueba por temperatura en asfaltos AC-20.	150
<b>Tabla 5.7.</b> Resumen de resultados de la prueba por temperatura en asfaltos modificados con aditivo Evotherm.	151
<b>Tabla 5.8.</b> Resumen de resultados de la prueba por temperatura en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.	154
<b>Tabla 5.9.</b> Resumen de resultados de la prueba por humedad en asfalto de Salamanca.	157
<b>Tabla 5.10.</b> Resumen de resultados de la prueba por humedad en asfalto de Tula.	158
<b>Tabla 5.11.</b> Resumen de resultados de la prueba por humedad en asfalto de Salina Cruz.	159
<b>Tabla 5.12.</b> Resumen de los resultados de la prueba por humedad en asfaltos AC-20.	160

<b>Tabla 5.13.</b> Resumen de los resultados de la prueba por humedad en asfaltos modificados con aditivo Evotherm.	162
<b>Tabla 5.14.</b> Resumen de los resultados de la prueba por humedad en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.	165
<b>Tabla 5.15.</b> Resumen de resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Salamanca.	167
<b>Tabla 5.16.</b> Resumen de resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Tula.	168
<b>Tabla 5.17.</b> Resumen de resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Salina Cruz.	169
<b>Tabla 5.18.</b> Resumen de los resultados de la prueba por envejecimiento en asfaltos AC-20.	170
<b>Tabla 5.19.</b> Resumen de los resultados de la prueba por envejecimiento en asfaltos modificados con aditivo Evotherm.	172
<b>Tabla 5.20.</b> Resumen de los resultados de la prueba por envejecimiento en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.	174

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1.1.</b> Movimiento doméstico y de carga. (Fuente: Manual estadístico de la SCT, 2007).	17
<b>Fig. 1.2.</b> Sistema carretero nacional. (Fuente: Manual estadístico de la SCT, 2007).	17
<b>Fig. 1.1.</b> Distribución de zonas para asfaltos según su clasificación por viscosidad (AC).	23
<b>Fig. 1.2.</b> Zonas para definir el grado PG.	26
<b>Fig. 1.3.</b> Masilla asfáltica. (Fuente: <a href="http://www.densoquimica.com">www.densoquimica.com</a> ).	32
<b>Fig. 1.4.</b> Slurry Seal. (Fuente: <a href="http://www.tolcan.com">www.tolcan.com</a> ).	33
<b>Fig. 1.5.</b> Concreto asfáltico. (Fuente: <a href="http://www.ituzaingo.gmssa.com.ar">www.ituzaingo.gmssa.com.ar</a> ).	33
<b>Fig. 1.6.</b> Macadam asfáltico. (Fuente: <a href="http://www.highwaysmaintenance.com">www.highwaysmaintenance.com</a> ).	33
<b>Fig. 1.7.</b> Clasificación de las mezclas asfálticas.	35
<b>Fig. 1.8.</b> Mezclas asfálticas cerradas o densas. (Fuente: E. Álvarez Et al).	36
<b>Fig. 1.9.</b> Mezclas asfálticas abiertas. (Fuente: E. Álvarez et al).	36
<b>Fig. 3.1.</b> Refinerías de la República Mexicana. (Fuente: PEMEX Refinación).	56
<b>Fig. 3.2.</b> Refinería de Tula. (Fuente: <a href="http://www.militante.org/node/912">http://www.militante.org/node/912</a> ).	57
<b>Fig. 3.3.</b> Ubicación de la refinería de Salamanca. (Fuente: Petróleos Mexicanos. Pemex Refinación).	58
<b>Fig. 3.4.</b> Refinería de Salamanca. (Fuente: <a href="http://www.eluniversal.com.mx/notas/586976.html">http://www.eluniversal.com.mx/notas/586976.html</a> ).	59
<b>Fig. 3.5.</b> Refinería de Salamanca. (Fuente: <a href="http://www.puntomedio.com.mx/nacional/2012/10/22/estalla-re%EF%AC%81neria-en-oaxaca;-reportan-dos-heridos/9761/">http://www.puntomedio.com.mx/nacional/2012/10/22/estalla-re%EF%AC%81neria-en-oaxaca;-reportan-dos-heridos/9761/</a> ).	60
<b>Fig. 3.6.</b> Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto AC-20 de Salamanca.	62
<b>Fig. 3.7.</b> Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto AC-20 de Tula.	62
<b>Fig. 3.8.</b> Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto AC-20 de Salina Cruz.	63
<b>Fig. 3.9.</b> Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto de Salamanca con aditivo Evotherm.	63
<b>Fig. 3.10.</b> Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto de Tula con aditivo Evotherm.	64
<b>Fig. 3.11.</b> Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto de Salina Cruz con aditivo Evotherm.	64
<b>Fig. 3.12.</b> Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto de Salamanca con aditivo Quimikao.	65
<b>Fig. 3.13.</b> Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto de Tula con aditivo Quimikao.	65
<b>Fig. 3.14.</b> Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto de Salina Cruz con aditivo Quimikao.	66
<b>Fig. 3.15.</b> Horno rotatorio de película delgada (RTFO).	67
<b>Fig. 3.16.</b> Peso del frasco y la muestra de asfalto para RTFO.	68
<b>Fig. 3.17.</b> Muestras de asfalto para RTFO.	68
<b>Fig. 3.18.</b> Colocación de las muestras de asfalto en el RTFO.	69
<b>Fig. 3.19.</b> Peso de las muestras después del RTFO.	69
<b>Fig. 3.20.</b> Peso de las muestras de asfalto para PAV.	71
<b>Fig. 3.21.</b> Calibración del PAV para iniciar la prueba.	71
<b>Fig. 3.22.</b> Colocación de las charolas con las muestras de asfalto para prueba del PAV.	72
<b>Fig. 3.23.</b> Colocación de la tapa del PAV.	72
<b>Fig. 3.24.</b> Calibración de la presión del PAV para inicio de la prueba.	73

<b>Fig. 3.25.</b> Extracción de las charolas del PAV después de la prueba y colocación dentro del horno para eliminar el aire atrapado en el asfalto.	73
<b>Fig. 3.26.</b> Reómetro de corte dinámico (DSR).	75
<b>Fig. 3.27.</b> Muestras para ensayo en DSR.	76
<b>Fig. 3.28.</b> Colocación de la muestra en DSR para ensayo.	76
<b>Fig. 3.29.</b> Ajuste de platos en DSR para ensayo.	77
<b>Fig. 3.30.</b> Colocación de tapa en DSR para ensayo.	77
<b>Fig. 3.31.</b> Inicio de la prueba en el DSR.	78
<b>Fig. 3.32.</b> Terminación de prueba en el DSR.	78
<b>Fig. 3.33.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Salamanca.	79
<b>Fig. 3.34.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Salamanca después del RTFO.	80
<b>Fig. 3.35.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Salamanca después del PAV.	80
<b>Fig. 3.36.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Tula.	81
<b>Fig. 3.37.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Tula después del RTFO.	82
<b>Fig. 3.38.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Tula después del PAV.	82
<b>Fig. 3.39.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Salina Cruz.	83
<b>Fig. 3.40.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Salina Cruz después del RTFO.	84
<b>Fig. 3.41.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Salina Cruz después del PAV.	84
<b>Fig. 3.42.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Salamanca con aditivo Quimikao.	85
<b>Fig. 3.43.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Salamanca con aditivo Quimikao después del RTFO.	86
<b>Fig. 3.44.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Salamanca con aditivo Quimikao después del PAV.	86
<b>Fig. 3.45.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Tula con aditivo Quimikao.	87
<b>Fig. 3.46.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Tula con aditivo Quimikao después del RTFO.	88
<b>Fig. 3.47.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Tula con aditivo Quimikao después del PAV.	88
<b>Fig. 3.48.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Salina Cruz con aditivo Quimikao.	89
<b>Fig. 3.49.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Salina Cruz con aditivo Quimikao después del RTFO.	90
<b>Fig. 3.50.</b> Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Salina Cruz con aditivo Quimikao después del PAV.	90
<b>Fig. 4.1.</b> Máquina de Baño María.	96
<b>Fig. 4.2.</b> Ubicación del banco de material AGC.	98
<b>Fig. 4.3.</b> Cribado de material pétreo.	99
<b>Fig. 4.4.</b> Lavado y tendido para secado de material pétreo.	99
<b>Fig. 4.5.</b> Material pétreo utilizado para fabricar las probetas.	100
<b>Fig. 4.6.</b> Horno eléctrico.	101
<b>Fig. 4.7.</b> Charolas y moldes dentro del horno eléctrico.	102

<b>Fig. 4.8.</b> Charolas, moldes y asfalto dentro del horno eléctrico.	102
<b>Fig. 4.9.</b> Círculos de papel.	103
<b>Fig. 4.10.</b> Aplicación del asfalto en el material pétreo.	103
<b>Fig. 4.11.</b> Mezclado de material pétreo con el asfalto.	104
<b>Fig. 4.12.</b> Colocación de la base de papel en el molde.	104
<b>Fig. 4.13.</b> Colocación de la mezcla en el molde Marshall.	105
<b>Fig. 4.14.</b> Colocación del molde de papel sobre el molde Marshall.	105
<b>Fig. 4.15.</b> Colocación del molde sobre la máquina compactadora Marshall.	105
<b>Fig. 4.16.</b> Probeta Marshall lista para ser compactada.	106
<b>Fig. 4.17.</b> Contador Marshall.	106
<b>Fig. 4.18.</b> Vuelta de la probeta para la compactación.	107
<b>Fig. 4.19.</b> Probeta Marshall compactada por ambos lados.	107
<b>Fig. 4.20.</b> Probeta Marshall dentro del molde.	108
<b>Fig. 4.21.</b> Retiro de las bases de papel Probeta Marshall.	108
<b>Fig. 4.22.</b> Probeta Marshall en proceso de enfriamiento.	108
<b>Fig. 4.23.</b> Retiro de la probeta Marshall del molde.	109
<b>Fig. 4.24.</b> Limpieza del equipo utilizado en la fabricación de probetas.	109
<b>Fig. 4.25.</b> Probetas fabricadas.	110
<b>Fig. 4.26.</b> Máquina de los Ángeles.	110
<b>Fig. 4.27.</b> Peso inicial (Pi) de una Probetas Marshall.	111
<b>Fig. 4.28.</b> Peso final (Pf) de una Probetas Marshall.	111
<b>Fig. 4.29.</b> Refrigerador y horno eléctrico.	112
<b>Fig. 4.30.</b> Probetas Marshall dentro del refrigerador y horno eléctrico.	112
<b>Fig. 4.31.</b> Efecto de la temperatura en asfalto AC-20 de Salamanca.	114
<b>Fig. 4.32.</b> Efecto de la temperatura en asfalto AC-20 de Tula.	115
<b>Fig. 4.33.</b> Efecto de la temperatura en asfalto AC-20 de Salina Cruz.	116
<b>Fig. 4.34.</b> Efecto de la temperatura en asfalto de Salamanca con aditivo Evotherm.	117
<b>Fig. 4.35.</b> Efecto de la temperatura en asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.	118
<b>Fig. 4.36.</b> Efecto de la temperatura en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.	119
<b>Fig. 4.37.</b> Efecto de la temperatura en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.	120
<b>Fig. 4.38.</b> Efecto de la temperatura en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.	121
<b>Fig. 4.39.</b> Efecto de la temperatura en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.	122
<b>Fig. 4.40.</b> Máquina de baño María con agua.	123
<b>Fig. 4.41.</b> Probetas Marshall dentro de la Máquina de baño María.	123
<b>Fig. 4.42.</b> Retiro de las probetas Marshall de la Máquina de baño María.	124
<b>Fig. 4.43.</b> Efecto de la humedad en asfalto AC-20 de Salamanca.	125
<b>Fig. 4.44.</b> Efecto de la humedad en asfalto AC-20 de Tula.	126
<b>Fig. 4.45.</b> Efecto de la humedad en asfalto AC-20 de Salina Cruz.	127
<b>Fig. 4.46.</b> Efecto de la humedad en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.	128
<b>Fig. 4.47.</b> Efecto de la humedad en asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.	129
<b>Fig. 4.48.</b> Efecto de la humedad en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo	



Evotherm.	130
<b>Fig. 4.49.</b> Efecto de la humedad en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.	131
<b>Fig. 4.50.</b> Efecto de la humedad en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.	132
<b>Fig. 4.51.</b> Efecto de la humedad en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.	133
<b>Fig. 4.52.</b> Probetas Marshall confinadas.	134
<b>Fig. 4.53.</b> Probetas Marshall confinadas dentro del horno.	135
<b>Fig. 4.54.</b> Efecto del envejecimiento en asfalto AC-20 de Salamanca.	136
<b>Fig. 4.55.</b> Efecto del envejecimiento en asfalto AC-20 de Tula.	137
<b>Fig. 4.56.</b> Efecto del envejecimiento en asfalto AC-20 de Salina Cruz.	138
<b>Fig. 4.57.</b> Efecto del envejecimiento en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.	139
<b>Fig. 4.58.</b> Efecto del envejecimiento en asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.	140
<b>Fig. 4.59.</b> Efecto del envejecimiento en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.	141
<b>Fig. 4.60.</b> Efecto del envejecimiento en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.	142
<b>Fig. 4.61.</b> Efecto del envejecimiento en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.	143
<b>Fig. 4.62.</b> Efecto del envejecimiento en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.	144
<b>Fig. 5.1.</b> Carta de viscosidad vs temperatura de los asfaltos estudiados.	145
<b>Fig. 5.2.</b> Efecto de la temperatura en asfalto de Salamanca.	147
<b>Fig. 5.3.</b> Efecto de la temperatura en asfalto de Tula.	148
<b>Fig. 5.4.</b> Efecto de la temperatura en asfalto de Salina Cruz.	149
<b>Fig. 5.5.</b> Efecto de la temperatura en asfaltos AC-20.	150
<b>Fig. 5.6.</b> Efecto de la temperatura en asfaltos modificados con aditivo Evotherm.	151
<b>Fig. 5.7.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles con efecto por temperatura.	152
<b>Fig. 5.8.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles con efecto por temperatura.	152
<b>Fig. 5.9.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles con efecto por temperatura.	153
<b>Fig. 5.10.</b> Efecto de la temperatura en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.	154
<b>Fig. 5.11.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por temperatura.	155
<b>Fig. 5.12.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por temperatura.	155
<b>Fig. 5.13.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por temperatura.	156
<b>Fig. 5.14.</b> Efecto de la humedad en asfalto de Salamanca.	157
<b>Fig. 5.15.</b> Efecto de la humedad en asfalto de Tula.	158
<b>Fig. 5.16.</b> Efecto de la humedad en asfalto de Salina Cruz.	159
<b>Fig. 5.17.</b> Efecto de la humedad en asfaltos AC-20.	160

---

<b>Fig. 5.18.</b> Probetas de asfaltos AC-20 después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por humedad.	161
<b>Fig. 5.19.</b> Probetas de asfaltos AC-20 después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por humedad.	161
<b>Fig. 5.20.</b> Efecto de la humedad en asfaltos modificados con aditivo Evotherm.	162
<b>Fig. 5.21.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles con efecto por humedad.	163
<b>Fig. 5.22.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles con efecto por humedad.	163
<b>Fig. 5.23.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles con efecto por humedad.	164
<b>Fig. 5.24.</b> Efecto de la humedad en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.	165
<b>Fig. 5.25.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por humedad.	166
<b>Fig. 5.26.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por humedad.	166
<b>Fig. 5.27.</b> Efecto del envejecimiento en asfalto de Salamanca.	167
<b>Fig. 5.28.</b> Efecto del envejecimiento en asfalto de Tula.	168
<b>Fig. 5.29.</b> Efecto del envejecimiento en asfalto de Salina Cruz.	169
<b>Fig. 5.30.</b> Efecto del envejecimiento en asfaltos AC-20.	170
<b>Fig. 5.31.</b> Probetas de asfaltos AC-20 después de la prueba de los Ángeles con efecto por envejecimiento.	171
<b>Fig. 5.32.</b> Probetas de asfaltos AC-20 después de la prueba de los Ángeles con efecto por envejecimiento.	171
<b>Fig. 5.33.</b> Efecto del envejecimiento en asfaltos modificados con aditivo Evotherm.	172
<b>Fig. 5.34.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles.	173
<b>Fig. 5.35.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles.	173
<b>Fig. 5.36.</b> Efecto del envejecimiento en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.	174
<b>Fig. 5.37.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por envejecimiento.	175
<b>Fig. 5.38.</b> Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por envejecimiento.	175

## RESUMEN

El uso de **Mezclas Asfálticas Tibias**, en la construcción de pavimentos flexibles se ha extendido a nivel mundial debido a los grandes beneficios que proporcionan, los cuales se traducen principalmente en una amplia disminución de la contaminación así como un mejor desempeño y mayor vida útil.

Las **Mezclas Asfálticas Tibias** en México aun no se utilizan a gran escala, sin embargo ya se tiene la obligación de utilizarlas en todos los trabajos de pavimentación, repavimentación y bacheo en el Distrito Federal.

Esta investigación tiene como objetivo realizar una comparación del comportamiento de tres asfaltos AC-20 de diferentes refinerías mexicanas en su estado natural y empleando dos tipos de aditivos químicos para la elaboración de **Mezclas Asfálticas Tibias** de granulometría densa. La valoración de sus propiedades se hará mediante parámetros reológicos y el Método UCL<sup>®</sup>.

## INTRODUCCIÓN

El transporte es un elemento esencial en el desarrollo económico de la sociedad. Sin un buen sistema de transporte, ninguna región o nación puede alcanzar el uso óptimo de sus recursos naturales o la máxima productividad de su población. El progreso del transporte no está exento de costos, en ocasiones lamentables en vidas humanas, así como el daño al medio ambiente, es responsabilidad del ingeniero del transporte desarrollar un sistema de transporte de alta calidad que sea consistente con el presupuesto disponible y con la política social. El transporte es un elemento significativo para cualquier nación, ya que representa un alto porcentaje del producto interno bruto y emplea a una gran parte de la fuerza de trabajo de todo el país.

La historia del transporte ilustra que ha sido afectado por la tecnología, el costo y la demanda. Desde hace siglos se viene dando el desarrollo de diferentes modalidades del transporte: vías hidráulicas, ferrocarriles, carreteras y transportación por aire. En el pasado los ingenieros del transporte planificaron y construyeron los caminos, los sistemas de transporte masivo, los aeropuertos y las tuberías de la nación. En las décadas por venir se requerirán elementos adicionales del sistema, así como esfuerzos para mantener y operar de una manera segura y económica el vasto campo de la transportación. Dentro del modo de transporte carretero el vehículo y el camino han sido sujetos de grandes mejoras para estar en armonía con el medio ambiente.

Una carretera es una vía de dominio y uso público, proyectada y construida fundamentalmente para la circulación de vehículos automóviles. Se distingue de un simple camino porque está especialmente concebida para la circulación de vehículos de transporte.

La importancia de las carreteras radica en que es la columna vertebral del transporte, su construcción y mantenimiento se vuelven estratégicos. El invertir o no invertir menos de lo necesario conduce a pérdidas de capital o bien a gastos mayores en el futuro.

## IMPORTANCIA DE LAS CARRETERAS EN MÉXICO

Para México, la red carretera nacional constituye una parte fundamental, del sistema de transporte, ya que por esta vía, se desplaza el 53 % de la carga nacional y el 98 % de los pasajeros que se trasladan en el país. Movilizando 479 millones de toneladas y 3,170 millones de pasajeros al año.

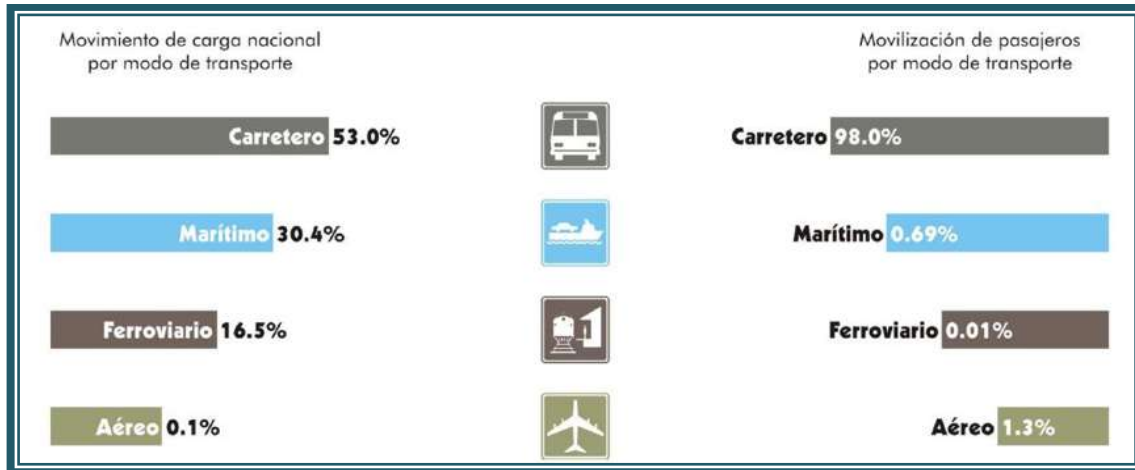


Fig. I.1. Movimiento doméstico y de carga. (Fuente: Manual estadístico de la SCT, 2007).

La calidad de la infraestructura carretera en México es un determinante de la competitividad de este sector, ya que es el principal modo de transporte utilizado en el país. La longitud carretera con la que cuenta es de aproximadamente 356,945 km.



Fig. I.2. Sistema carretero nacional. (Fuente: Manual estadístico de la SCT, 2007).

La inversión en infraestructura carretera del país es fundamental para permitir el constante y creciente intercambio de flujos de bienes y personas entre los polos de desarrollo, puertos y puntos fronterizos. Además de integrar físicamente a comunidades desfavorecidas con los polos de desarrollo, con la posibilidad de su acceso a bienes y servicios básicos, así como incentivar su desarrollo a largo plazo.

De manera general las carreteras se dividen en dos tipos:

- 1. Pavimentos de concreto hidráulico o rígidos**
- 2. Pavimentos asfálticos o flexibles**

Los pavimentos rígidos se integran por una capa (losa) de concreto construida mediante una mezcla de agregados pétreos, cemento portland y agua, para proporcionar al usuario una superficie de rodamiento uniforme.

Los pavimentos flexibles están formados por una mezcla asfáltica o aglomerado asfáltico que resulta de la combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico, de manera que los agregados quedan cubiertos con una película continua de ligante.

Los pavimentos flexibles por su temperatura de puesta en obra se clasifican en:

- Mezclas asfálticas en frío. El ligante suele ser una emulsión asfáltica, y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
- Templadas (60 °C - 100 °C). Son producidas usando emulsiones mezcladas en hornos convencionales para mezclas en caliente.
- Mezclas asfálticas en Caliente (150 °C - 180 °C). Se fabrican con asfaltos a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la del ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

Dentro de esta clasificación, existen las **Mezclas Asfálticas Tibias**. Se fabrican entre los 120 °C y los 145 °C, estas mezclas constituyen un grupo de tecnologías que pretenden reducir las temperaturas a las cuales son producidas y colocadas. Su principal objetivo es reunir las ventajas de las mezclas asfálticas en frío y en caliente, al disminuir las temperaturas de mezclado, tendido y compactación y mantener el porcentaje de vacíos sin la presencia de agua.

Los pavimentos flexibles, son una parte muy importante en la infraestructura del transporte en México, principalmente en el modo de transporte carretero ya que más del 80 % está construido con pavimentos flexibles.

En México, aún no se utilizan las **Mezclas Asfálticas Tibias** a gran escala, sin embargo, ya se están realizando varios estudios con los asfaltos mexicanos utilizando aditivos químicos para lograr la disminución de las temperaturas de mezclado, tendido y compactación, obteniendo resultados aceptables y logrando bajar estas temperaturas. Aún es un tema nuevo en nuestro país, es por eso que es muy importante que se lleven a cabo más investigaciones acerca de la utilización de **Mezclas Asfálticas Tibias**, para que sean utilizadas y obtener así los beneficios que brindan.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Determinar las ventajas que se tienen con el empleo de aditivos químicos para la elaboración de **Mezclas Asfálticas Tibias** de granulometría densa frente a las mezclas asfálticas en caliente.

### OBJETIVOS PARTICULARES

- Conocer el estado del arte de los asfaltos y mezclas asfálticas.
- Definir los tipos de asfaltos, los aditivos y los procedimientos por los cuales se llevará a cabo la investigación.
- Obtener las cartas de viscosidad vs temperatura y el análisis reológico de los asfaltos en estudio.
- Llevar a cabo la caracterización de los diferentes asfaltos empleando el método UCL<sup>®</sup>.
- Realizar el análisis e interpretación de los resultados de las diferentes pruebas llevadas a cabo.



**CAPÍTULO 1.-****ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS****1.1. ASFALTOS**

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida.

Los materiales asfálticos se emplean en la elaboración de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones, ya sea para aglutinar los materiales pétreos utilizados, para ligar o unir diferentes capas del pavimento; o bien para estabilizar bases o sub-bases. También se pueden usar para construir, fabricar o impermeabilizar otras estructuras, tales como algunas obras complementarias de drenaje, entre otras.

Los materiales asfálticos se clasifican en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación, como se indica en la siguiente tabla.

**Tabla 1.1.** Clasificación de los materiales asfálticos.

<b>Material asfáltico</b>	<b>Vehículo para su aplicación</b>	<b>Usos más comunes</b>
Cemento asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados.
Emulsión asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones.
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de sub-bases y bases hidráulicas.

### 1.1.1. CEMENTOS ASFÁLTICOS

Los cementos asfálticos son asfaltos obtenidos del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.

Según su viscosidad dinámica a sesenta 60 °C, los cementos asfálticos se clasifican como se indica en la **Tabla 1.2**, donde se señalan los usos más comunes de cada uno.

**Tabla 1.2.** Clasificación de los cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60 °C.

Clasificación	Viscosidad a 60 °C Pa*s(Poises)	Usos más comunes
AC-5	50 ± 10 (500 ± 100)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como <b>Zona 1</b> en la figura 1.1</li> <li>2.- En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen para riegos de impregnación, de liga y poreo con arena, así como en estabilizaciones.</li> </ol>
AC-10	100 ± 20 (1000 ± 200)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como <b>Zona 2</b> en la figura 1.1</li> <li>2.- En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como <b>Zona 1</b> en la figura 1.1</li> </ol>
AC-20	200 ± 40 (2000 ± 400)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como <b>Zona 3</b> en la figura 1.1</li> <li>2.- En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como <b>Zona 2</b> en la figura 1.1</li> </ol>
AC-30	300 ± 60 (3000 ± 600)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como <b>Zona 4</b> en la figura 1.1</li> <li>2.- En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como <b>Zona 3 y 4</b> en la figura 1.1</li> <li>3.- En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como en riego de impregnación.</li> </ol>

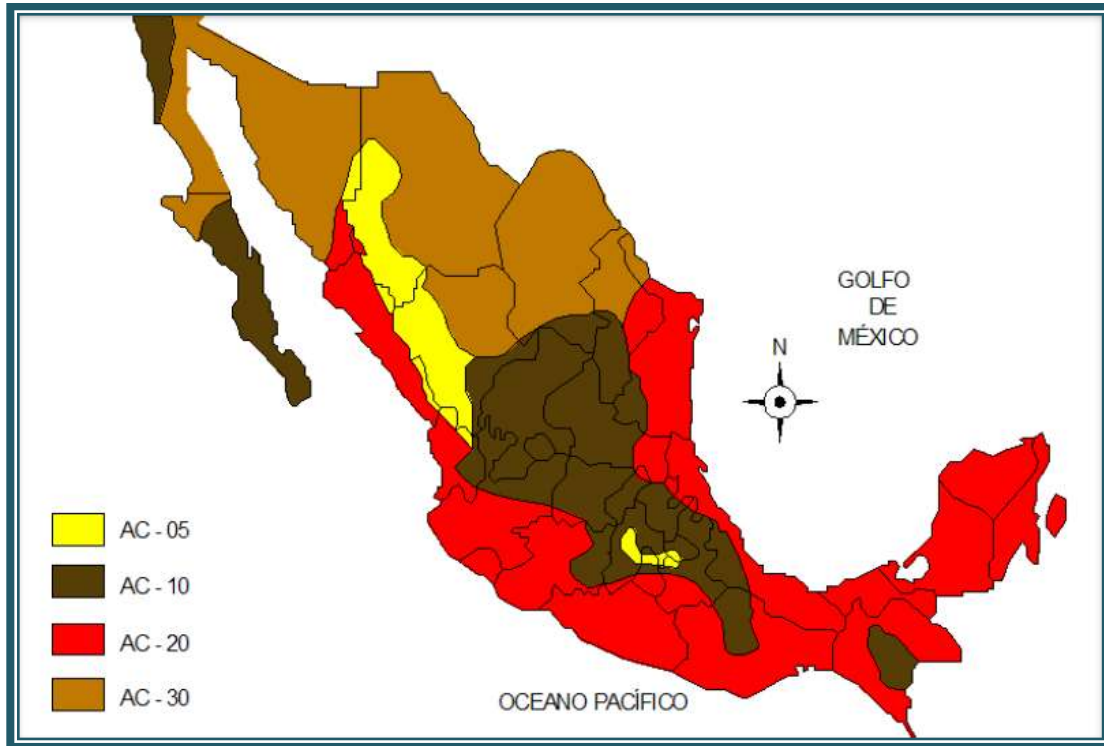


Fig. 1.1. Distribución de zonas para asfaltos según su clasificación por viscosidad (AC).

### 1.1.2. EMULSIONES ASFÁLTICAS

Las emulsiones asfálticas son dispersiones de diminutos glóbulos de asfalto en agua empleando un agente emulsificante que sirva para que el asfalto no repela el agua con la finalidad de fluidificar al cemento asfáltico y hacer aplicaciones en frío, siendo la fase dispersa o interna el asfalto y la fase continua o externa el agua. Las emulsiones se clasifican en aniónicas y catiónicas, dependiendo de la naturaleza del emulsificante. Se denominan emulsiones asfálticas aniónicas cuando el agente emulsificante confiere polaridad electronegativa a los glóbulos y emulsiones asfálticas catiónicas, cuando les confiere polaridad electropositiva.

**Las emulsiones asfálticas pueden ser de los siguientes tipos:**

- De rompimiento rápido, que generalmente se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos, a excepción de la emulsión ECR-60, que no se debe utilizar en la elaboración de éstas últimas.

- De rompimiento medio, que normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos en la mezcla es igual que dos por ciento o menor, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, nivelaciones y sobrecarpetas.
- De rompimiento lento, que comúnmente se utilizan para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas.
- Para impregnación, que particularmente se utilizan para impregnaciones de sub-bases y/o bases hidráulicas.
- Súper-estables, que principalmente se emplean en estabilizaciones de materiales y en trabajos de recuperación de pavimentos.

Según su contenido de cemento asfáltico en masa, su tipo y polaridad, las emulsiones asfálticas se clasifican como se indica en la **Tabla 1.3**.

**Tabla 1.3.** Clasificación de las emulsiones asfálticas.

Clasificación	Contenido de cemento asfáltico en masa %	Tipo	Polaridad
EAR-55	55	Rompimiento rápido	Aniónica
EAR-60	60		
EAM-60	60	Rompimiento medio	
EAM-65	65		
EAL-55	55	Rompimiento lento	
EAL-60	60		
EAI-60	60	Para impregnación	
ECR-60	60	Rompimiento rápido	Catiónica
ECR-65	65		
ECR-70	70		
ECM-65	65	Rompimiento medio	
ECL-65	65	Rompimiento lento	
ECI-60	60	Para impregnación	
ECS-60	60	Sobrestabilizada	

**Tabla 1.4.** Clasificación de los asfaltos rebajados.

Clasificación	Velocidad de fraguado	Tipo de solvente
FR-3	Rápida	Nafta, gasolina
FM-1	Media	Queroseno

### 1.1.3. CLASIFICACIÓN DE CEMENTOS ASFÁLTICOS SEGÚN SU GRADO PG

El **Grado de desempeño PG** es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las cuales un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El Grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a que estará sujeta durante su vida útil.

Los cementos asfálticos clasificados según su grado PG, son aquellos cuyo comportamiento en los pavimentos está definido por la temperatura máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación, dentro de las cuales se asegura un desempeño adecuado para resistir deformaciones o agrietamientos por temperaturas bajas o por fatiga, en condiciones de trabajo que se han correlacionado con ensayos especiales y simulaciones de envejecimiento a corto y largo plazo. Estos ensayos miden propiedades físicas que pueden ser directamente relacionadas, mediante principios de ingeniería, con el comportamiento en obra, y forman parte de los productos del Programa de Investigación de Carreteras desarrollado por la Unión Americana, conocida como la Tecnología SHRP por sus siglas en inglés Strategic Highway Research Program.

Un cemento asfáltico clasificado como PG 64 - 22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como 64 °C y tan bajas como -22 °C. Las temperaturas máximas y mínimas se extienden tanto como sea necesario con incrementos estandarizados de 6 °C. Sin embargo, generalmente las temperaturas máximas se consideran de 64 °C y 88 °C y las mínimas, de -40 °C a - 22 °C.

Los grados PG pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperaturas que se registran en el país, sin embargo, para fines prácticos, es recomendable seleccionar un cemento asfáltico que corresponda a uno de los 3 grados PG que se indican en la **Figura 1.2**, de acuerdo con el clima de la zona geográfica donde se le pretenda utilizar, de entre las zonas en que se ha dividido la República Mexicana que se muestra en la **Figura 1.2**, pero considerando que dentro de una misma zona, las condiciones del clima en una área determinada puede variar, lo que se debe tomar en cuenta para elegir el Grado PG adecuado.

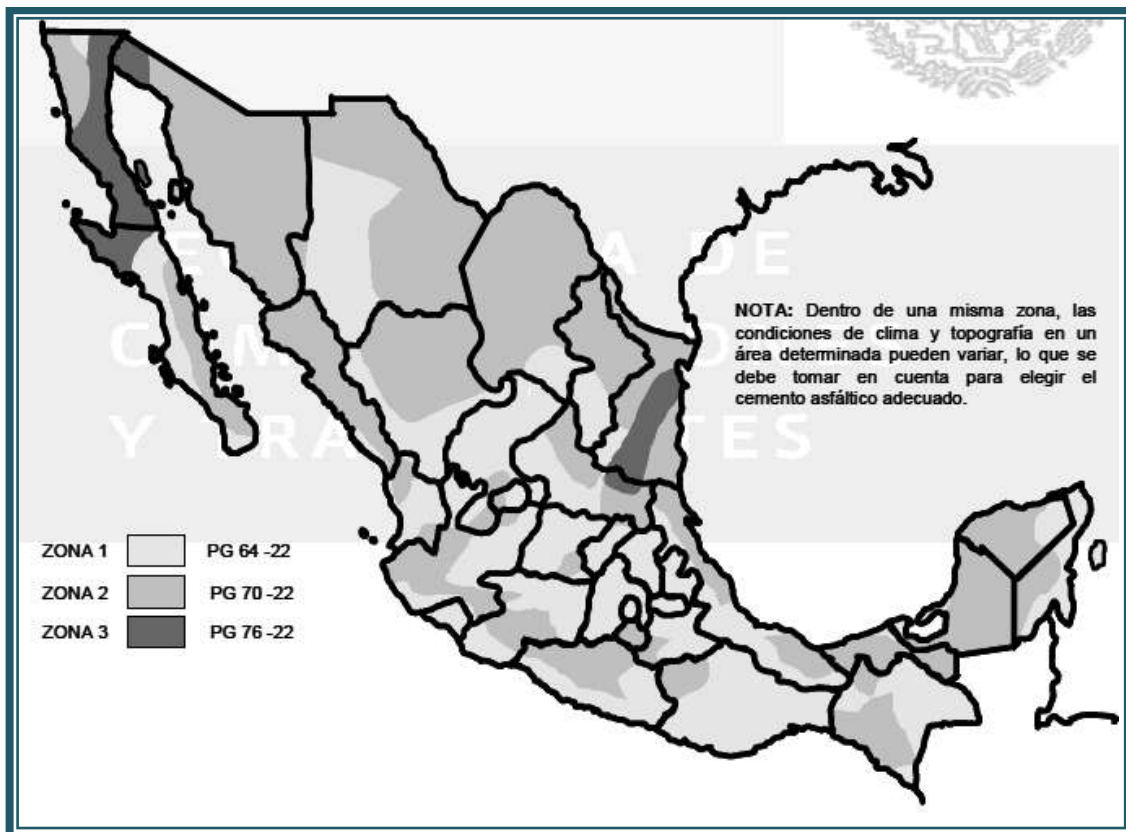


Fig. 1.2. Zonas para definir el grado PG.

La temperatura máxima del Grado PG seleccionado según el clima, se ajusta de acuerdo con la intensidad del tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante un período de servicio del pavimento de 10 años (SL10) y de acuerdo con la velocidad de operación, como se indica en la **tabla 1.5**.

**Tabla 1.5.** Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad del tránsito esperado y con la velocidad de operación.

Intensidad del tránsito ( $\Sigma L_{10}$ ) <sup>[1]</sup>	Grado PG seleccionado por clima	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta (10 y 30km/h)	Ajuste por tránsito detenido (cruceos)
$(\Sigma L_{10}) < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq (\Sigma L_{10}) \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$(\Sigma L_{10}) > 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

[1]  $\Sigma L_{10}$  = Número de ejes equivalentes de 8.2 ton., esperado durante un periodo de servicio del pavimento de 10 años.

### Requisitos de calidad para cementos asfálticos grado PG

- Los cementos asfálticos Grado PG, antes y después de envejecidos en el laboratorio para simular las condiciones del envejecimiento que se espera tengan durante su vida útil en la obra, cumplirán con los requisitos de calidad que se indican en la **Tabla 1.6**.
- Cuando un cemento asfáltico Grado PG se utilice para producir una emulsión asfáltica convencional que se empleará para la construcción de una carpeta estructural o de una carpeta delgada de rodadura, además de satisfacer lo establecido en la Fracción anterior, la emulsión asfáltica, según su tipo, cumplirá con los requisitos de calidad indicados en la Norma N-CMT-4-05-001,

Calidad de Materiales Asfálticos, antes de la prueba de película delgada.

- Cuando un cemento asfáltico Grado PG se utilice para producir un material asfáltico modificado, además de satisfacer lo establecido en la **Tabla 1.6**, el material asfáltico modificado, según su tipo y el modificador utilizado, cumplirá con los requisitos de calidad indicados en la Norma N-CMT-4-05-002, Calidad de los Materiales Asfálticos Modificados.

**Tabla 1.6.** Requisitos de calidad para cementos asfálticos Grado PG.

Grado de comportamiento	PG 64				PG 70				PG 76			PG 82			PG 88		
	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-22	-28	-34	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días), °C	64				70				76			82			88		
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34
<b>Asfalto original</b>																	
Punto de inflamación Cleveland <sup>14</sup> , °C, mín.	230																
Viscosidad dinámica a 135°C <sup>14</sup> , Pa·s (P <sup>12</sup> ), máximo	3																
Módulo reológico de corte dinámico (G' sen δ) <sup>17</sup> <sup>18</sup> , kPa, mínimo	1																
• Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	64				70				76			82			88		
<b>Después de prueba de película delgada y aire de horno <sup>14</sup></b>																	
Pérdida por calentamiento, %, máximo	1																
Módulo reológico de corte dinámico (G' sen δ) <sup>10</sup> , kPa, mínimo	2.2																
• Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	64				70				76			82			88		
<b>Después de envejecimiento en vasija de presión temperatura y aire</b>																	
Temperatura de envejecimiento PAV, °C																	
• En climas normales	100				100				100			100			100		
• En climas desérticos	100				110				110			110			110		
Índice de endurecimiento físico <sup>14</sup> , máximo	Reportar																
Rigidización (G' sen δ) <sup>16</sup> , kPa, máxima	5 000																
• Temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	25	22	19	16	28	25	22	19	31	28	25	34	31	28	34	31	28
Rigidez de Flexión S <sub>f</sub> <sup>10</sup> <sup>13</sup> , MPa, máximo (α=0,3 min)	300																
• Temperatura de prueba @ 60 s, °C	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-12	-18	-24	-12	-18	-24



[1] Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponda, de los Manuales que señalan en la Cláusula C. de la Norma N-CMT-4-05-004/08.

[2] Poises.

[3] Para control de calidad de producción de asfaltos normales sin modificar, cuando sean líquido newtoniano, la viscosidad dinámica del cemento asfáltico original puede sustituir al módulo de corte dinámico  $G^*/\text{Sen } \delta$ , a las temperaturas de prueba.

[4] El endurecimiento físico del asfalto es desarrollado de acuerdo con el número de muestras de viga, conforme a la determinación de la rigidez de flexión, mediante el Reómetro de flexión de viga BBR, excepto que las condiciones de tiempo se extiendan a 24 h y el valor  $m$  sea reportado únicamente para propósitos de información.

[5] Si la rigidez de flexión es menor a 300 MPa, no es necesario la prueba de tensión directa. Si la rigidez de flexión resulta entre 300 y 600 MPa, se requiere que la deformación a la ruptura en la prueba de tensión directa cumpla también con lo indicado en esta tabla. El valor  $m$  requerido será satisfactorio en ambos casos.

**Tabla 1.7.** Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad del tránsito esperado y con la velocidad de operación.

Intensidad del tránsito ( $\Sigma L_{10}$ ) <sup>[1]</sup>	Grado PG seleccionado por clima	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta (Entre 10 y 30 Km/h)	Ajuste por tránsito detenido (cruceos)
$\Sigma L_{10} < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq \Sigma L_{10} \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\Sigma L_{10} > 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

[1]  $\Sigma L_{10}$ = Número de ejes equivalentes de 8.2 ton. (FSAI), esperado durante un periodo de servicio del pavimento de 10 años.

#### 1.1.4. CEMENTOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como la oxidación. Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interface entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua. También aumenta la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos modificadores

por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclado con el material pétreo.

Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos se denominan Polímeros.

Los Polímeros son sustancias de alto peso molecular formadas por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas largas y sueltas. Algunos modificadores poliméricos que han dado buenos resultados, se enlistan a continuación:

- **Homopolímeros:** que tienen una sola unidad estructural (monómero).
- **Copolímeros:** tienen varias unidades estructurales distintas (EVA, SBS).
- **Elastómeros:** al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tienen deformaciones pseudo plásticas con poca elasticidad.

Los Polímeros más utilizados en los materiales asfálticos se agrupan de la siguiente forma:

- **Polímero tipo I**

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno-Butadieno (SB), entre otras. Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- **Polímero tipo II**

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímero elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- **Polímero tipo III**

Es modificador de asfaltos que mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo plastómero, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE) entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para poder elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- **Hule molido de neumáticos**

Es un modificador de asfaltos que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta, tratamientos superficiales.

## **1.2. MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Una mezcla asfáltica es una combinación elaborada con agregados pétreos y un material asfáltico, eventualmente con aditivos, cuyas propiedades mecánicas dependen de las propiedades de cada uno de los componentes, de su proporción relativa en la mezcla. Puede elaborarse en frío o en caliente, en planta o en el sitio.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros.

Las mezclas de emulsión en frío pueden proporcionar una máxima reducción en las temperaturas, pero recientemente se han desarrollado una variedad de técnicas que proveen una importante reducción en las temperaturas de mezcla y pavimentación sin el cuidadoso trabajo de formulación necesario para obtener mezclas de emulsión exitosas. Estos procesos se conocen genéricamente como “**Mezcla Tibia**” y hay unos 15 sistemas de mezcla tibia que compiten en el mercado.

Menores temperaturas de mezclado resultan en menor endurecimiento por oxidación del asfalto por el proceso de mezcla. Mientras que es beneficioso a largo plazo en la vida del pavimento, la rigidez inicial tanto del asfalto como de la carretera puede ser reducida comparada con la mezcla convencional caliente.

Las mezclas asfálticas, según el procedimiento de mezclado, se clasifican como sigue:

### 1.2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

#### 1. De acuerdo a la granulometría del agregado pétreo

- **Masilla asfáltica.** Polvo mineral más ligante.



Fig. 1.3. Masilla asfáltica. (Fuente: [www.densoquimica.com](http://www.densoquimica.com)).

- **Mortero asfáltico.** Agregado fino más masilla



Fig. 1.4. Slurry Seal. (Fuente: [www.tolcan.com](http://www.tolcan.com)).

- **Concreto asfáltico.** Agregado grueso más mortero.



Fig. 1.5. Concreto asfáltico. (Fuente: [www.ituzaingo.gmssa.com.ar](http://www.ituzaingo.gmssa.com.ar)).

- **Macadam asfáltico.** Agregado grueso más ligante asfáltico

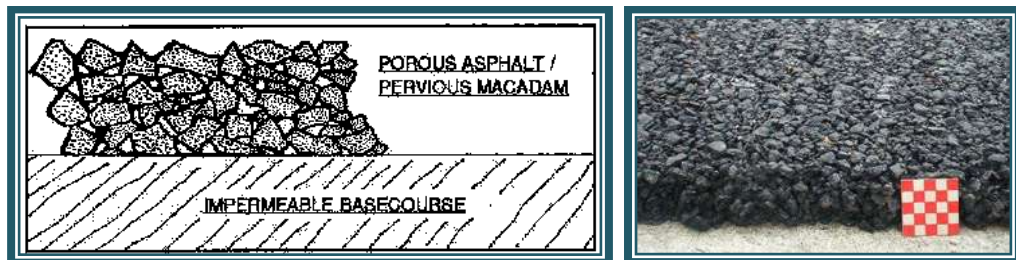


Fig. 1.6. Macadam asfáltico. (Fuente: [www.highwaysmaintenance.com](http://www.highwaysmaintenance.com)).

## 2. Por temperatura de puesta en obra

- **Mezclas asfálticas en frío.** El ligante suele ser una emulsión asfáltica, y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
- **Templadas (60 °C - 100 °C).** Estas mezclas son aquellas que combinan características de las mezclas en frío y en caliente. Así, estas son producidas usando emulsiones mezcladas en hornos convencionales para mezclas en caliente. Estas mezclas permiten maximizar ahorros energéticos y las emisiones, aprovechando la humedad presente en los materiales. También reducen los riesgos por quemaduras a los operarios, mayor flexibilidad en el tiempo para el transporte y aplicación, ya que los materiales no se enfrían tan rápido. Así como la disminución en el envejecimiento del asfalto.
- **Tibias o Semi-Calientes (120 °C - 145 °C).** Las Mezclas Asfálticas Tibias (Warm Mix Asphalt), constituyen un grupo de tecnologías que pretenden reducir las temperaturas a las cuales son producidas y colocadas.

La mezcla tibia, normalmente utiliza un aditivo o procedimiento que permite la producción y colocación de la mezcla a temperaturas desde 20 hasta 55 °C por debajo de las temperaturas de las mezclas en caliente.

La fabricación de **Mezclas Tibias** se puede conseguir mediante diferentes procesos, sin embargo, todos estos procesos tienen un fundamento común, disminuir la viscosidad del asfalto para poder fabricar, transportar y poner en obra mezclas bituminosas a temperaturas más bajas, sin perder su manejabilidad ni prestaciones.

Las técnicas para la elaboración de **Mezclas Asfálticas Tibias** se pueden dividir en cuatro grupos:

- a) Las que involucran modificaciones en la planta y en el proceso de mezclado.
- b) Las que introducen agua para formar espuma en el aglomerado del asfalto.
- c) Las que involucran la modificación del asfalto con ceras.
- d) Aquellas que usan aditivos químicos de naturaleza surfactante.



- **Mezclas asfálticas en Caliente (150 °C - 180 °C).** Se fabrican con asfaltos a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la del ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

En la figura 1.7 se muestra la clasificación de las mezclas asfálticas en caliente.

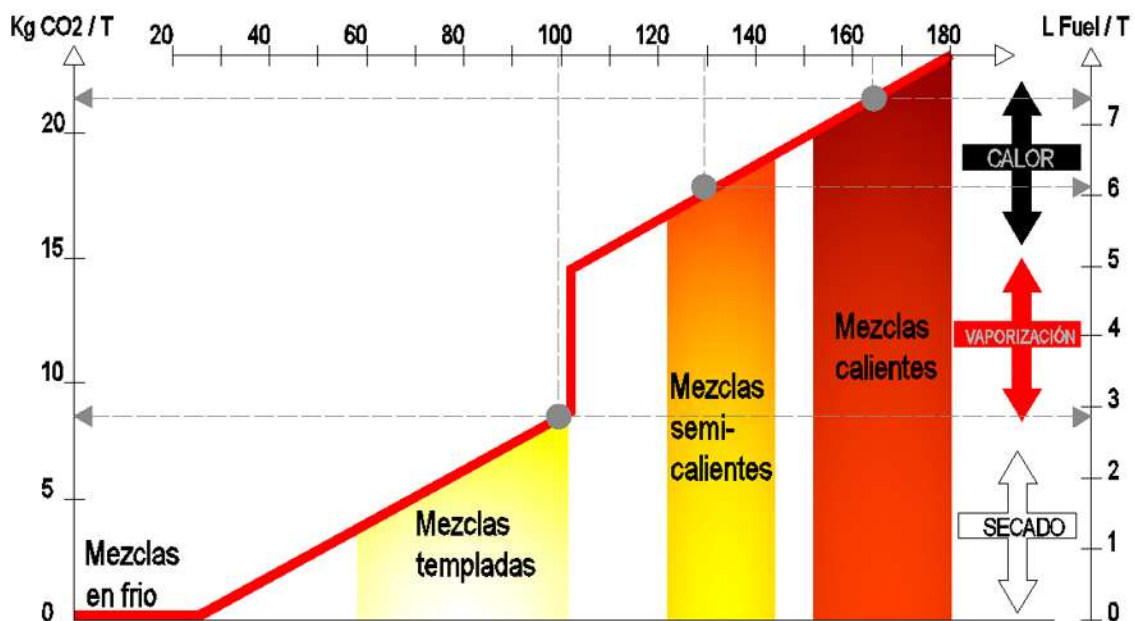
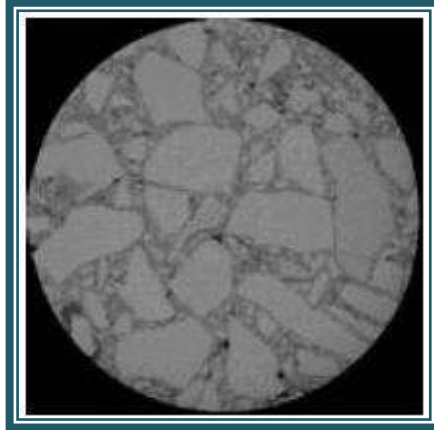


Fig. 1.7. Clasificación de las mezclas asfálticas.

### 3. Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.

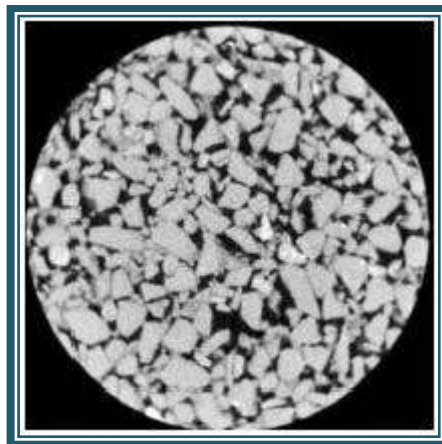
Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- **Mezclas Cerradas o Densas.** La relación de vacíos no supera el 6 %.



**Fig. 1.8.** Mezclas asfálticas cerradas o densas. (Fuente: E. Alvarez Et al).

- **Mezclas Semi-Cerradas o Semi-Densas.** La relación de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- **Mezclas Abiertas.** La relación de vacíos supera el 12 %.



**Fig. 1.9.** Mezclas asfálticas abiertas. (Fuente: E. Alvarez et al.)

- **Mezclas Porosas o Drenantes.** La relación de vacíos es superior al 20 %.



#### 4. Por el tamaño máximo del agregado pétreo.

- **Mezclas Gruesas.** Donde el tamaño máximo del agregado pétreo es  $> 10$  mm.
- **Mezclas Finas.** También llamadas microaglomerados y algunos morteros asfálticos, son mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

#### 5. Por la estructura del agregado pétreo.

- **Mezclas con Esqueleto mineral.** Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo: las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.
- **Mezclas sin Esqueleto mineral.** No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo los diferentes tipos de masillas asfálticas.

#### 6. Por la granulometría.

- **Mezclas Continuas.** Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo dentro del rango granulométrico.
- **Mezclas Discontinuas.** Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo dentro del rango granulométrico.

En la tabla 1.8. se muestra un resumen de la clasificación de las mezclas asfálticas:

**Tabla 1.8.** Mezclas asfálticas según los diferentes parámetros de clasificación.

PARÁMETRO DE CLASIFICACIÓN	TIPO DE MEZCLA
Fracciones de agregado empleados	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En frío
	Templadas
	Tibias
	Calientes
Huecos en la mezcla (n)	Cerradas $n < 6 \%$
	Semicerradas $6 < n < 12 \%$
	Abiertas $12 < n < 20 \%$
	Porosas $n < 20 \%$
Tamaño máximo del agregado ( $t_{m\acute{a}x}$ )	Gruesas $t_{m\acute{a}x} > 10 \text{ mm}$
	Finas $t_{m\acute{a}x} < 10 \text{ mm}$
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

### 1.2.2. MATERIALES PÉTREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los materiales pétreos o áridos, son aquellos que aportan la estabilidad mecánica, soportan las cargas de los vehículos y la traducen en menores esfuerzos para las capas inferiores a la carpeta. En algunos casos suele ser de gran aportación en el costo de la construcción, y cuyo valor esta determinado directamente por los acarrees.

El avance en la calidad de las mezclas asfálticas ha ido de la mano con la evolución de los tratamientos que se le han dado a los materiales pétreos, de aquí que en la actualidad se aplique una selección rigurosa para asegurar su calidad, mencionado lo anterior los materiales utilizados para la elaboración de las mezclas asfálticas deberán de ser de los tipos siguientes:

- Materiales que requieren ser cribados. Son aquellos poco o nada cohesivos que al extraerlos queden sueltos y que deban ser tamizados por una o varias mallas para obtener los tamaños requeridos.
- Materiales que requieren ser triturados parcialmente y cribados. Sus características principales son ser poco o nada cohesivos, o bien materiales cohesivos que al extraerlos resultan con terrones que pueden disgregarse, así mismo aquellos en los que una porción del material requiera disminuir su tamaño para que sea el adecuado para la mezcla asfáltica.
- Materiales que requieren ser triturados totalmente y cribados. Son aquellos extraídos de bancos, principalmente de roca dura que requieren de un medio mecánico para que se presente el fracturamiento del agregado y de esta manera reducir considerablemente sus tamaños, al mismo tiempo que se tamizan para obtener los tamaños requeridos.
- Actualmente se ha utilizado el pavimento reciclado o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) como una importante fuente de agregado mineral para la producción de mezclas asfálticas nuevas.

Los materiales pétreos pueden requerir de lavado o no, según la materia orgánica y/o cohesiva que presenten, así mismo de las especificaciones particulares que deba requerir el material para ser mezclado con el asfalto.

Por lo general para cumplir con las especificaciones deseadas se toman suficientes características para que representen la calidad y el comportamiento del material durante el mezclado y durante su periodo de vida útil. Siempre buscando que el agregado provea a la mezcla de un fuerte esqueleto mineral para resistir las repetidas aplicaciones de carga.

Enseguida se muestra cuales son las características para tomar en cuenta en la selección de un adecuado agregado pétreo.

- **Peso específico**

La normativa de 1987 determina el peso específico relativo aparente por inmersión del material pétreo en cemento asfáltico fluidificado para después calcular el porcentaje de vacíos de mezclas asfálticas compactadas.

- **Granulometría**

La granulometría nos indica parte fundamental del comportamiento que tendrá la mezcla asfáltica elaborada y si existe esqueleto mineral o no. Esta ha variado considerablemente de una especificación a otra más reciente, esto debido al avance en los instrumentos de prueba de las mezclas asfálticas ya elaboradas y su investigación.

- **Límites de Atterberg y pruebas complementarias.**

Se incluyen en las normas de la SCT desde 1981 a fin de conocer el grado de plasticidad de los finos, que sería un indicio de la presencia de arcilla, la cual puede ser perjudicial para la mezcla asfáltica dependiendo de su actividad, cantidad y forma en que se presente. En general cuando existe presencia de la arcilla en el material a utilizar para la elaboración de las mezclas asfálticas ocasiona una deficiencia en la adherencia de la película asfáltica, además si se encuentra en forma de grumos, estos constituyen un punto débil en la carpeta, principalmente en presencia de agua. Para analizar esta característica se realiza mediante la prueba de contracción lineal.

- **Afinidad entre el material pétreo y el asfalto**

El objetivo es determinar algunas propiedades relativas a la afinidad entre las partículas del material pétreo y la película de asfalto que las cubre, para conocer si entre dichos materiales existe una liga que permita condiciones de estabilidad satisfactorias. La determinación de la afinidad del material pétreo es un factor importante para juzgar el comportamiento de las capas asfálticas de un pavimento. Las fallas encontradas en los pavimentos asfálticos debidas a falta de adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto, obedecen, en la mayor parte de los casos, a la introducción de agua en la carpeta asfáltica. Si el agregado pétreo o mejor dicho la superficie de la partícula de agregado, presenta mayor afinidad al agua que al asfalto, la primera es atraída hacia la superficie de la partícula, desalojando la película de asfalto, quedando destruida la adherencia existente entre ambos materiales, que es necesaria para darle estabilidad a la carpeta. Este tipo de agregados pétreos se denominan hidrófilos, es decir, que presentan afinidad por el agua. A los materiales pétreos que presentan mayor afinidad por el asfalto que por el agua se les llama hidrófobos.

La falta de adherencia entre el asfalto y el agregado puede ser debida también a la presencia de una película de polvo o de arena fina que se encuentra adherida a la partícula de material pétreo.

- **Resistencia a la abrasión**

Esta característica se determina mediante el desgaste de los materiales pétreos que se emplean en la construcción de mezclas asfálticas, carpetas de riegos, riegos de sello y otros usos, para estimar el efecto perjudicial que origina a los materiales su grado de alteración, su baja resistencia estructural, planos de debilitamiento, planos de cristalización, forma de las partículas ya que en las partículas con forma laja las aristas vivas sufren una fuerte abrasión durante la prueba.

- **Resistencia al Intemperismo**

Esta resistencia es un índice de grado de alteración que puede alcanzar el material por la acción de los agentes atmosféricos. Se determina desde 1981 (Norma SCT) con la prueba de intemperismo acelerado y tiene por objeto estimar la alteración que pueden sufrir los materiales pétreos al estar expuestos a la acción del intemperismo, cuando se utilizan en la construcción de carpetas y riegos de sello.

- **Forma de las partículas**

La resistencia de las partículas al quiebre es en función de la forma de la partícula, para ello se determina la relación entre las dimensiones de las partículas de material pétreo, con el objeto de clasificarlas en cuanto a su forma alargada o forma de laja y conocer los porcentajes que de cada uno de ellas contienen los materiales pétreos utilizados en la construcción de mezclas asfálticas. Las partículas en forma de laja son aquellas que tienen una relación entre su espesor y su ancho menor de cero punto seis, mientras que las partículas alargadas son las que tienen una relación entre su largo y su ancho mayor de uno punto ocho. Por lo tanto el objetivo es determinar el contenido de partículas alargadas y lajeadas en una muestra de material.

## CAPÍTULO 2.-

# MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS

La **Mezcla Tibia**, normalmente utiliza un aditivo o procedimiento que permite la producción y colocación de la mezcla a temperaturas desde 20 hasta 55 °C por debajo de las temperaturas de la mezcla en caliente equivalente.

La fabricación de **Mezclas Tibias** (WMA) se puede conseguir mediante diferentes procesos, sin embargo, todos estos procesos tienen un fundamento común, disminuir la viscosidad del asfalto para poder fabricar, transportar y poner en obra mezclas bituminosas a temperaturas más bajas, sin perder su manejabilidad ni prestaciones.

Las **Mezclas Asfálticas Tibias** (Warm Mix Asphalt) son producidas por tecnologías que tienden a reducir la viscosidad del asfalto con el objetivo de facilitar el mezclado del asfalto con el agregado y la compactación de la mezcla obteniendo muchas ventajas respecto a las mezclas en caliente tradicionales. Esta reducción de temperatura varía según la tecnología empleada y puede ser desde 20 hasta 55 °C menos que las mezclas en caliente.

Todas las tecnologías de **Mezclas Asfálticas Tibias** (Warm Mix Asphalt) se basan en obtener la viscosidad del asfalto para elaborar la mezcla (170 centipoise) y para compactar (280 centipoise) a la más baja temperatura posible, usando diversos aditivos, pero cuidando en no afectar las propiedades reológicas a las temperaturas a las cuales resistirá el tráfico de los vehículos. Las tecnologías de **Mezclas Tibias** respetan todas las especificaciones del método de diseño de las mezclas asfálticas, en el caso de Estados Unidos respetan todas las especificaciones del método SUPERPAVE, únicamente varían la viscosidad del asfalto a las temperaturas entre 100 y 150 °C.

## 2.1. ESTADO DEL ARTE

Las **Mezclas Asfálticas Tibias**, están generando un gran interés en la tecnología de la industria carretera. En varios países del mundo, docenas de agencias y contratistas en carreteras, están colaborando para realizar las demostraciones de campo y las ejecuciones de la mezcla tibia. Virtualmente, todas las demostraciones han tenido éxito hasta ahora. Los europeos han usado la mezcla tibia por más de 10 años con resultados aceptables.

Los humos azulados, gases y olor que se pueden asociar con la mezcla en caliente han desaparecido. Las emisiones de gas de chimenea se han reducido aún más. Los consumos de combustible han caído desde el 11 hasta el 30 %. La funcionalidad ha mejorado, así la compactación es más fácil, aún utilizando un pavimento reciclado (RAP) en la mezcla.

Con la utilización de las **Mezclas Asfálticas Tibias**, se ha logrado incrementar la cantidad de pavimento reciclado en las mezclas. Las distancias de acarreo y temporada de pavimentación se han alargado, esto es posible debido a que las mezclas se están produciendo a temperaturas más bajas el ligante se envejece menos en el proceso de producción.

Los productos más conocidos y utilizados para modificar la viscosidad del asfalto son las ceras y parafinas. Las ceras, suelen ser naturales y obtenidas de residuos fósiles de plantas. Químicamente son esterres de ácidos y alcoholes grasos de elevado peso molecular. Las parafinas, materiales sintéticos de elevado peso molecular y que se diferencian de las naturales, por tener cadenas más cortas de átomos de carbono. De otra parte, existen en el mercado otros productos que modifican la reología del asfalto con agregados finos, entre los cuales se pueden enumerar los tensoactivos o líquidos polifuncionales de base orgánica, que actúan como hiperplastificantes. Los cristales de zeolita granular, que contiene un 21 % de agua en masa y que por contacto con el asfalto a elevadas temperaturas, crea una espuma que le permite disminuir las temperaturas de fabricación.



La facilidad de producir y pavimentar con mezclas a bajas temperaturas ha sido ya claramente demostrada y han sido producidas varios miles de toneladas de estas mezclas, sin embargo algunos problemas siguen aun sin resolverse. Debido a las bajas temperaturas de proceso, especialmente en plantas de mezclado de tambor continuo seco, las **Mezclas Tibias** deben ser compatibles con agregados insuficientemente secos, en particular en aquellos sistemas en los que se espuma el asfalto mediante la introducción de agua, donde es necesario mostrar que el agua en el sistema, ausente en las mezclas en caliente, no causa daño ya sea por pérdida de adherencia o por una pérdida de cohesión del asfalto. Los aditivos químicos con tendencia a reducir la rigidez del asfalto a la temperatura de pavimentación pueden exacerbar el problema.

**Las técnicas para la elaboración de Mezclas Asfálticas Tibias se pueden dividir en cuatro grupos:**

- Adición de modificaciones en la planta y en el proceso de mezcla.
- Adición de agua para formar espuma en el aglomerado del asfalto.
- Adición de ceras al asfalto.
- Adición de aditivos químicos (tensoactivos).

Los aditivos que se pretenden analizar para la elaboración de estas mezclas en estudio son aditivos químicos.

Los aditivos químicos modifican la tensión superficial consiguiendo un mejor mezclado a menor temperatura.

### **Algunos de los aditivos químicos empleados para la elaboración de Mezclas Asfálticas Tibias son:**

- Evotherm TM ET. Más de 100 mil ton de mezcla se han aplicado en el mundo.
- Rediset TM. Más de 1 mil ton de mezcla se han aplicado en USA.
- Revix TM ET. Más de 6000 mil ton de mezcla se han aplicado en USA.

## **2.2. VENTAJAS DE UTILIZAR MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS**

En los últimos años a nivel mundial se observa cómo ha aumentado la presión ejercida sobre la protección medioambiental, especialmente en lo concerniente a las carreteras. Frente a estos nuevos requisitos, la industria de la construcción ha lanzado nuevas iniciativas que apuestan al desarrollo de técnicas y productos que limitan el impacto de la construcción de carreteras sobre el medio ambiente. Es así que se han introducido nuevas modificaciones en la elaboración de las mezclas. Un desarrollo muy importante es el caso de las llamadas **Mezclas Tibias** o "**Warm Mix**", que se fabrican a temperaturas por debajo de las usualmente utilizadas.

La utilización de **Mezclas Asfálticas Tibias** tiene los siguientes beneficios:

### **Beneficios Ambientales**

- Reducción de energía en la elaboración de las mezclas.
- Reducción en la emisión de gases.
- Mejores condiciones de trabajo
- Reducción de emisión de gases de tipo COV.

### **Beneficios constructivos**

- Reducción de la transformación (rigidización) del ligante durante las etapas de elaboración, transporte y colocación.
- Trabajabilidad aceptable a menores temperaturas.
- Menores velocidades de enfriamiento, por lo que se tienen mayores distancias de acarreo.
- Posibilidad de emplear mayores cantidades de RAP (Reclimed Asphalt Paviment).
- Menor oxidación por lo que se tiene mayor durabilidad.

### **Desventajas de utilizar mezclas asfálticas**

Las principales ventajas de utilizar **Mezclas Asfálticas Tibias** son en el costo inicial de la mezcla, ya que el empleo de los diferentes aditivos, polímeros y ceras ocasionan un costo adicional.

## **2.3. ACUERDOS INTERNACIONALES SOBRE REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)**

El *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, conocido también por *Panel Intergubernamental del Cambio Climático* o más resumidamente por las siglas *IPCC (Intergubernamental Panel on Climate Change)*, tiene como objetivo asesorar a los gobiernos sobre los problemas climáticos y recopilar las investigaciones científicas conocidas en unos informes periódicos de evaluación. Estos informes de evaluación constan de varios volúmenes, y proporcionan todo tipo de información científica, técnica y socio-económica sobre el cambio climático, sus causas, sus posibles efectos, y las medidas de respuesta correspondientes.

### **Protocolo de Kyoto**

El Protocolo de Kyoto de 1997 fue una extensión de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Actualmente lo han firmado 184 partes, 183 países y la Unión Europea, y todos lo han ratificado salvo dos: Estados Unidos y Kazajistán. Los países

industrializados se comprometieron a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo es un recorte conjunto de las emisiones de gases de efecto invernadero de al menos el 5 % con respecto a los niveles de 1990 en el periodo de compromiso de 2008 - 2012.

**Los denominados gases de efecto invernadero son:**

- Vapor de agua (H<sub>2</sub>O).
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).
- Metano (CH<sub>4</sub>).
- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).
- Ozono (O<sub>3</sub>).
- Clorofluorocarbonos (CFCl<sub>3</sub>).

**Contaminación ambiental ocasionada por la utilización de las mezclas asfálticas en caliente**

La utilización de mezclas asfálticas en caliente, ocasionan un alto grado de contaminación al medio ambiente, principalmente por los gases que se expiden en la fabricación y colocación de estas mezclas, contribuyendo en gran medida al aumento del fenómeno llamado efecto invernadero.

Se denomina **efecto invernadero** al fenómeno por el cual determinados gases, que son componentes de la atmósfera, los cuales retienen la energía que el suelo terrestre emite y una parte de la misma la remiten a la superficie de la Tierra. Este fenómeno evita que gran parte de la energía emitida por la Tierra se transmita directamente al espacio, lo que provocaría un continuo enfriamiento de la superficie terrestre e impediría la vida.

**El proyecto Fenix en la UPC. Mezclas Semi-Calientes**

El protocolo de Kyoto firmado por la Unión Europea ha venido a imponer a la industria nuevos condicionamientos medioambientales, especialmente los relacionados con la emisión de los gases del efecto invernadero (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>). Es por esto, que desde hace varios años la industria asfáltica ha venido desarrollando nuevos productos y procedimientos para ahorrar energía y disminuir la contaminación ambiental, los cuales han sido

enfocados especialmente en la fabricación de mezclas a temperaturas inferiores a las convencionales (150 °C - 180 °C). Las **Mezclas Tibias** (WMA Warm Mix Asphalt), definidas como mezclas calientes capaces de ser mezcladas y compactadas a temperaturas inferiores a las convencionales, han brindado una solución a la contaminación ambiental. Entre los diferentes beneficios obtenidos se encuentra la reducción de los gases de efecto invernadero, que según estudios realizados por D'Angelo *et al* (2008), se puede disminuir entre un 15 – 40 % la cantidad de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, entre un 10 - 30 % de CO y un 60 - 70 % de NO<sub>x</sub>. Otro beneficio obtenido es la reducción del consumo de combustible, que según Jenkins (2000), se puede ahorrar entre un 10 y 35 % de gasoil. De otra parte, reducir la temperatura de fabricación y compactación de la mezcla caliente permite que las distancias entre la planta y la obra se incrementen. Por último, autores como Gil, S *et al* (2009), manifiestan una reducción entre el 30 - 50 % de la emisión de humos e hidrocarburos en el proceso de fabricación, extendido y compactación.

### **Bonos de carbono**

Los bonos de carbono son un mecanismo internacional de descontaminación para reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente; es uno de los tres mecanismos propuestos en el Protocolo de Kyoto para la reducción de emisiones causantes del calentamiento global o efecto invernadero (GEI o gases de efecto invernadero).

El sistema ofrece incentivos económicos para que empresas privadas contribuyan a la mejora de la calidad ambiental y se consiga regular la emisión generada por sus procesos productivos, considerando el derecho a emitir CO<sub>2</sub> como un bien canjeable y con un precio establecido en el mercado. Un bono de carbono representa el derecho a emitir una tonelada de dióxido de carbono permite mitigar la generación de gases invernadero, beneficiando a las empresas que no emiten o disminuyen la emisión y haciendo pagar a las que emiten más de lo permitido.

## **El Mercado de "Bonos de Carbono"**

El nombre de “bonos de carbono” se ha dado como un nombre genérico a un conjunto de instrumentos que pueden generarse por diversas actividades de reducción de emisiones. Así, se puede decir que existen “varios tipos” de bonos de carbono, dependiendo de la forma en que éstos fueron generados:

1. Certificados de Reducción de Emisiones (CERs).
2. Montos Asignados Anualmente (AAUs).
3. Unidades de Reducción de Emisiones (ERUs).
4. Unidades de Remoción de Emisiones (RMUs).

### **1. Certificados de Reducción de Emisiones (CER)**

Los países del Anexo I que inviertan en proyectos bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio, pueden obtener Certificados de Reducción de Emisiones por un monto equivalente a la cantidad de bióxido de carbono equivalente que se dejó de emitir a la atmósfera como resultado del proyecto. Para ello, el proyecto debió cumplir con los requisitos establecidos por el **Consejo Ejecutivo del Mecanismo de Desarrollo Limpio**.

### **2. Montos Asignados Anualmente (AAU)**

Corresponde al monto total de emisiones de gases de efecto invernadero que a un país se le permite emitir a la atmósfera durante el primer período de compromiso (2008 - 2012) del Protocolo de Kioto. Cada país divide y asigna su respectivo monto a empresas localizadas en su territorio a manera de límite de emisión por empresa.

### **3. Unidades de Reducción de Emisiones (ERU)**

Corresponde a un monto específico de emisiones de gases de efecto invernadero que dejaron de ser emitidas por la ejecución de un proyecto de Implementación Conjunta.

#### **4. Unidades de Remoción de Emisiones (RMU)**

Corresponden a créditos obtenidos por un país durante proyectos de captura de carbono. Estas unidades o créditos solamente pueden ser obtenidas por países del Anexo I del Protocolo de Kioto y pueden obtenerse también en proyectos de Implementación Conjunta. Las Unidades de Remoción de Emisiones solamente pueden ser usadas por los países dentro del período de compromiso durante el cual fueron generadas, y son para cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones. Estos créditos no pueden ser considerados en períodos de compromiso posteriores.

Las transacciones de bonos pueden ser desde una simple compra o venta de una cantidad específica de bonos, hasta una estructura de compra-venta con diversas opciones.

Todas las operaciones de compra-venta en el comercio de bonos de carbono están regidas por un contrato entre el comprador y el vendedor.

No hay un valor “oficial” sobre el precio de una tonelada de CO<sub>2</sub> reducida o no emitida. Aunque algunas agencias multilaterales han establecido ciertos precios para los proyectos de reducción de emisiones financiados por ellas mismas (por ejemplo, hasta 2005, el Banco Mundial emplea un precio de \$5 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente no emitida), el precio de la tonelada está sujeto a oferta y demanda de bonos de carbono en el mercado.

Dado que existen diferentes esquemas para el comercio de los bonos y diferentes sitios del mundo donde se pueden comprar y vender, pueden existir precios diferentes por cada tonelada de CO<sub>2</sub>.

#### **2.4. MÉXICO CAMPO FÉRTIL EN BONOS DE CARBONO**

Sembrar y cuidar árboles para capturar dióxido de carbono es una muestra de negocio sustentable la nación mexicana es el número 14 en emisiones de gases de efecto invernadero y genera entre 1.5 y 1.8 % del mundo.

De acuerdo con el Banco Mexicano de Comercio Exterior (Bancomext), México emite al aire 643 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> al año, y “el potencial de reducción es inmenso, de 100 millones de toneladas métricas”, asegura Enrique Nieto, director ejecutivo de Organismos Financieros Internacionales de esa entidad. No obstante, Nieto dice que sólo se han aprobado proyectos que representan reducciones por 17 millones de toneladas por la Junta Ejecutiva de las Naciones Unidas, que certifica las iniciativas para dar forma al mercado de bonos de carbono.

## 2.5. MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS EN MÉXICO

Las **Mezclas Asfálticas Tibias (Templadas)** son los productos resultantes de los procesos industriales de combinación de triturado pétreo, cemento asfáltico y aditivo producidos en un rango de 120 °C y 151 °C.

En México las **Mezclas Asfálticas Tibias**, son una alternativa reciente, sin embargo ya se están utilizando cada vez más, como medida de protección al ambiente teniendo así una disminución de emisiones contaminantes.

En la Ciudad de México se cuenta con un nuevo equipo de producción de mezcla asfáltica, el cual consta de una Planta de Asfalto Estacionaria Ecológica marca Almix, modelo Duo Drum, en la cual se producen diferentes Mezclas Asfálticas Tibias como se muestra en la **tabla 2.1**.



**Tabla 2.1.** Mezclas Templadas producidas en la planta de asfalto del Distrito Federal.

<b>Mezcla asfáltica</b>	<b>Tipo de asfalto</b>	<b>Temperatura de Mezclado (°C)</b>
Convencional Templada	AC-20 y Aditivo	120 – 125 125 – 130
Modificada Templada A	Polímero SBS, 76-22 y Aditivo	139 – 146 146 -151
Modificada Templada B	Polímero SBS, 70-28 y Aditivo	125 – 135 135 - 140

Debido a las ventajas que ofrecen las **Mezclas Tibias**, el día 12 de Octubre del 2010, se publicó en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el acuerdo por el que se establece el uso obligatorio de **Mezclas Asfálticas Templadas** en los trabajos de pavimentación, repavimentación y bacheo, así como para otras obras que realice el gobierno del Distrito Federal. El cual se llevó a cabo con la finalidad de que se tenga una disminución de emisiones y partículas contaminantes a la atmósfera. Es así como cada vez se incrementa más el uso de estas mezclas logrando así obtener sus beneficios.

## **CAPÍTULO 3.-**

# **CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LOS ASFALTOS ESTUDIADOS**

La industria petrolera de México, es uno de los principales generadores de fuentes de ingresos económicos en el país. La industria mexicana de exploración y producción petrolera ocupa un lugar significativo entre los países productores de petróleo en el mundo, gracias a sus reservas y producción de crudo y gas.

La industria de la refinación en nuestro país presenta distintos retos, entre los que se encuentran la creciente demanda de los productos derivados del petróleo vinculada al desarrollo económico del país; el compromiso en el cuidado del medio ambiente a través de la elaboración de combustibles cada vez más limpios; maximizar el valor del petróleo procesado mejorando eficiencias y rentabilidad. Aunado a esto existe una incertidumbre respecto a la disponibilidad de crudos cada vez más pesados que requerirían de procesos más complejos para la obtención de los petrolíferos que requiere el país.

Otro de los grandes retos que enfrenta la industria de refinación del país en el futuro cercano será el ampliar la capacidad de distribución y almacenamiento de productos petrolíferos; en este sentido, se planea ampliar y reubicar terminales de almacenamiento, ampliar los sistemas de carga y descarga, rehabilitar los tanques y sistemas de seguridad y renovar la flotilla de reparto local. A esta planeación se suma la posible entrada en operación de una nueva refinería hacia 2015 que incrementará la producción nacional de petrolíferos.

### 3.1. REFINERÍAS DE MÉXICO

**Petróleos Mexicanos (Pemex)** es una empresa pública paraestatal mexicana petrolera, creada en 1938, que cuenta con un régimen constitucional para la explotación de los recursos energéticos. Es el único organismo que produce, distribuye y comercializa petrolíferos en todo el territorio mexicano, para lo cual lleva a cabo los procesos en refinerías.

La estrategia para mejorar el desempeño, en el corto y mediano plazo, ha sido la de adoptar las mejores prácticas de la industria en términos de esquemas de negocios, procesos, productividad, medio ambiente y seguridad industrial en las operaciones; también se ha fortalecido la capacidad de ejecución y se ha revitalizado la actividad exploratoria, a fin de lograr que PEMEX Exploración y Producción se convierta en la empresa petrolera más exitosa del siglo XXI.

PEMEX Exploración y Producción, opera en cuatro regiones del país:

- Región norte
- Región sur
- Región noroeste
- Región suroeste

En la figura 3.1. Se muestran las refinerías de México.



Fig. 3.1. Refinerías de la República Mexicana. (Fuente: PEMEX Refinación).

## 3.2. ASFALTOS ESTUDIADOS

En el presente trabajo se utilizaron asfaltos AC-20 provenientes de las refinerías de Tula, ubicada en estado de Hidalgo, de la refinería de Salina Cruz, ubicada en el estado de Oaxaca y de la refinería de Salamanca, ubicada en el estado de Guanajuato.

### 3.2.1. REFINERÍA TULA

La Refinería Miguel Hidalgo se encuentra localizada en el Estado de Hidalgo, en el municipio de Tula de Allende, a 82 km. al norte de la Ciudad de México.

Sus instalaciones ocupan un área total de 749 hectáreas, que se encuentran estratégicamente situadas por encontrarse entre los principales productores de aceite crudo y el mayor consumidor de combustible.

La refinería Miguel Hidalgo, fue la primera refinería planeada de forma integral con plantas de proceso de hidrocarburo de alta capacidad. Su construcción se llevó a cabo en varias etapas. La primera etapa se inauguró el 18 de marzo de 1976.

Esta refinería es considerada como una de las más importantes en el país por su capacidad instalada, y la porción del mercado que controla, ya que procesa el 24 % de crudo total que se refina en México.

Tula cuenta actualmente con una capacidad de refinación de 325,000 barriles por día. El área productiva está integrada por 10 sectores de proceso que incluyen plantas de proceso, plantas ecológicas, sistemas de bombeo y almacenamiento de productos y un sector de servicios auxiliares.



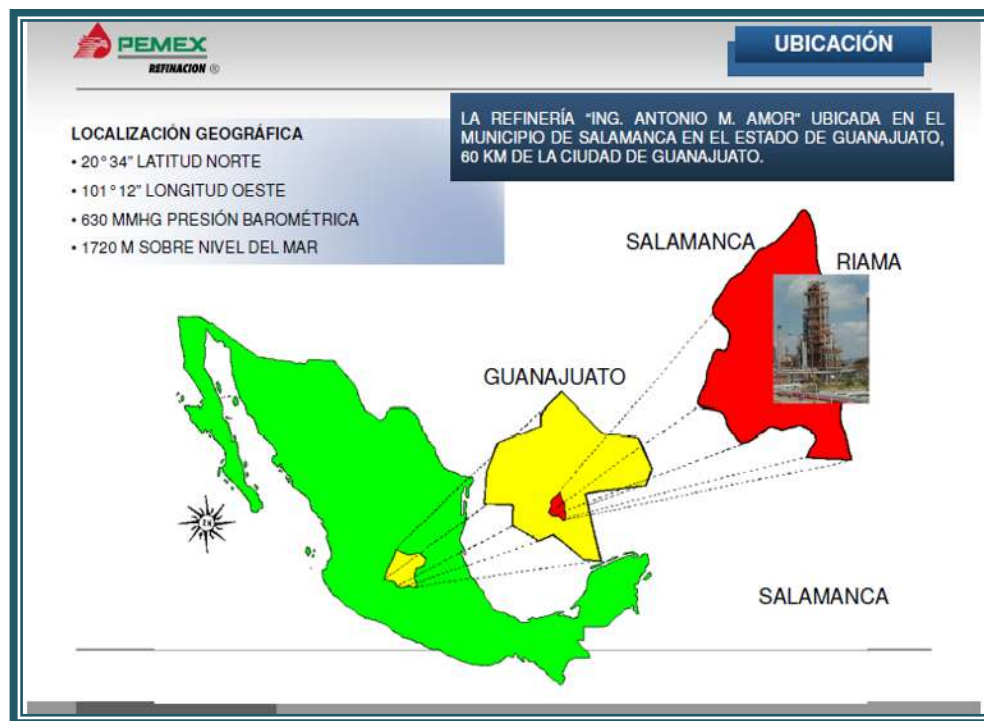
**Fig. 3.2.** Refinería de Tula. (Fuente: <http://www.militante.org/node/912>).

Siendo la calidad una de las prioridades de Pemex Refinación, en Tula se cuenta con un área de laboratorios con equipo de punta para el análisis de las diferentes gasolinas, cuya información permite constantemente, mejorar la calidad de éstas.

Con el fin de no quedar rezagados ante el desarrollo que impone la creciente demanda de energéticos, tanto en la calidad como en cantidad y oportunidad, Pemex Refinación, puso en marcha el Plan de Modernización de la Instrumentación de todos los procesos de la Refinería Miguel Hidalgo, que tiene como objetivo instalar Sistemas de Control Distribuido y Avanzado a todas las plantas de la primera etapa de la refinería e integrarlas en dos Cuartos de Control Centralizado.

### 3.2.2. REFINERÍA SALAMANCA

La refinería, ubicada en el central estado de Guanajuato, tiene una capacidad de procesamiento de 245,000 barriles por día (bpd) la quinta mayor instalación de las seis refinerías que tiene México y abastece de refinados a las zona centro-oeste del país.



**Fig. 3.3.** Ubicación de la refinería de Salamanca. (Fuente: Petróleos Mexicanos. Pemex Refinación).

El 30 de julio de 1998, la Refinería Ing. Antonio M. Amor (RIAMA), cumplió 48 años de haber iniciado sus operaciones. Este acontecimiento tiene un especial significado para todos sus trabajadores, pues detrás de esta fecha memorable se encuentra el trabajo, el esfuerzo y la responsabilidad de varias generaciones de petroleros. Cada una de ellas ha enfrentado, en su momento y tiempo, retos difíciles y todas, sin excepción, han sabido solucionarlos en forma exitosa.



**Fig. 3.4.** Refinería de Salamanca. (Fuente: <http://www.eluniversal.com.mx/notas/586976.html>).

Actualmente, la Refinería de Salamanca está conformada por 53 plantas de proceso las cuales elaboran 42 productos terminados. Inició operaciones en 1950 y ha tenido varias etapas de crecimiento en 1955, 1962, 1970-74, 1979, hasta la última en 1992-96 con las plantas del paquete ecológico. Es de esperar que las instalaciones más antiguas representen la mayor área de oportunidad para sustituir nueva tecnología que incluye conceptos de protección al ambiente, mayor eficiencia y mayor rentabilidad.

Es por eso que a partir de 1986, Pemex ha realizado acciones para mejorar la calidad de los combustibles automotores e industriales utilizados en México. Estas acciones están encaminadas a mejorar las especificaciones de los combustibles para reducir la cantidad de emisiones contaminantes.



### 3.2.3. REFINERÍA SALINA CRUZ

Con el objetivo de elaborar los productos petrolíferos que cubran parte de la demanda nacional, basándose en las necesidades de consumo, además de realizar la exportación de crudo y destilados por las costas mexicanas del litoral del Pacífico, Petróleos Mexicanos proyectó la construcción de la Refinería Ing. Antonio Dovalí Jaime, la cual inició sus operaciones en el mes de abril de 1979, y desde entonces ha sido un centro de refinación en constante crecimiento como lo marca la cronología de sus operaciones.

La Refinería Ing. Antonio Dovalí Jaime ocupa una superficie total de 600 hectáreas localizadas a cinco kilómetros al noreste de la ciudad y puerto de Salina Cruz, Oaxaca. El municipio de Salina Cruz se ubica sobre la costa del Océano Pacífico, en una latitud norte 16°09'30" y longitud oeste 95°01'30", y está catalogado como puerto de altura y de gran cabotaje.

Actualmente, Salina Cruz cuenta con una población de 230,000 habitantes y es considerado como uno de los puertos más importantes del Pacífico mexicano y una de las ciudades con brillante porvenir en el estado de Oaxaca.



**Fig. 3.5.** Refinería de Salamanca. (Fuente: <http://www.puntomedio.com.mx/nacional/2012/10/22/estalla-re%EF%AC%81neria-en-oaxaca;-reportan-dos-heridos/9761/>).



A partir de la puesta en operación de la Refinería Ing. Antonio Dovalí Jaime, ésta ha registrado un constante crecimiento que la ubica como la más grande del sistema petrolero de refinación en el contexto nacional, con capacidad para procesar 330,000 BPD de crudo.

La distribución de los productos refinados se efectúa a través de la Terminal de Ventas Terrestre localizada en Salina Cruz, Oax., la cual abastece la zona de influencia que conforman las agencias de ventas del estado de Oaxaca; las de Tuxtla Gutiérrez, Arriaga y Tapachula, en el estado de Chiapas; así como a los estados de Veracruz, Tabasco, Yucatán y México.

### **3.3. CARTAS DE VISCOSIDAD VS TEMPERATURA DE LOS ASFALTOS ESTUDIADOS**

La carta de viscosidad vs temperatura del asfalto, se obtiene para conocer las temperaturas de mezclado y compactación del mismo en la elaboración de mezclas asfálticas.

Fueron obtenidas, las cartas de viscosidad vs temperatura de los asfaltos estudiados.

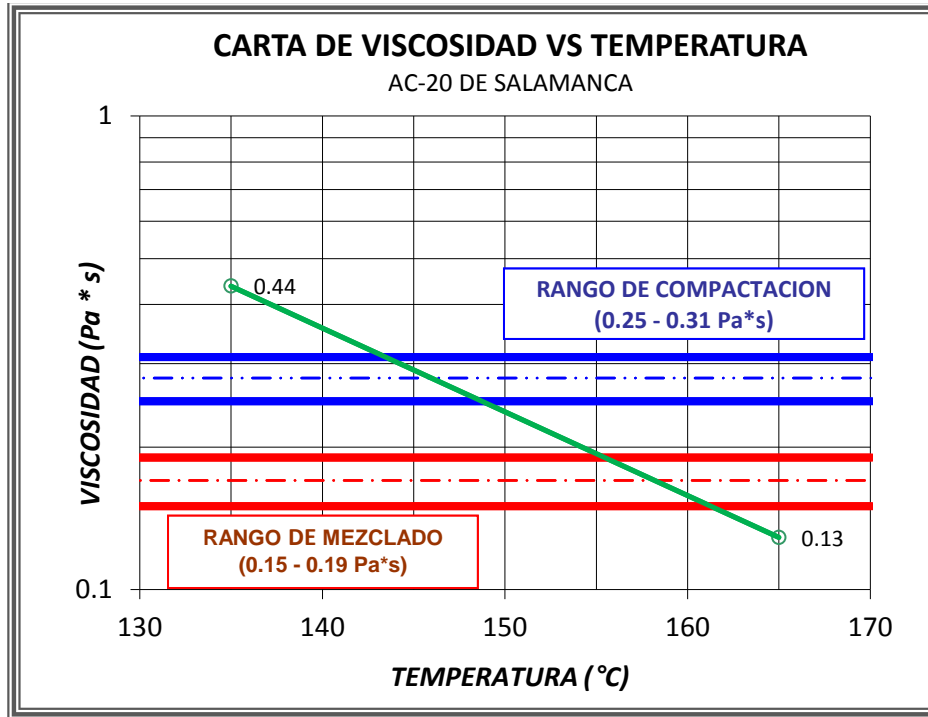


Fig. 3.6. Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto AC-20 de Salamanca.

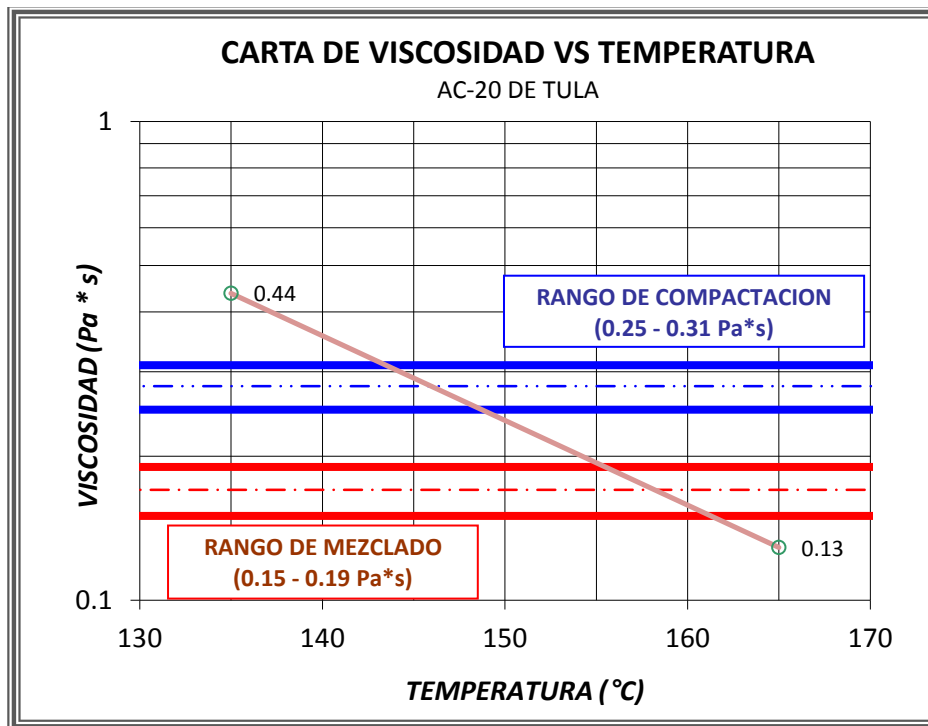


Fig. 3.7. Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto AC-20 de Tula.

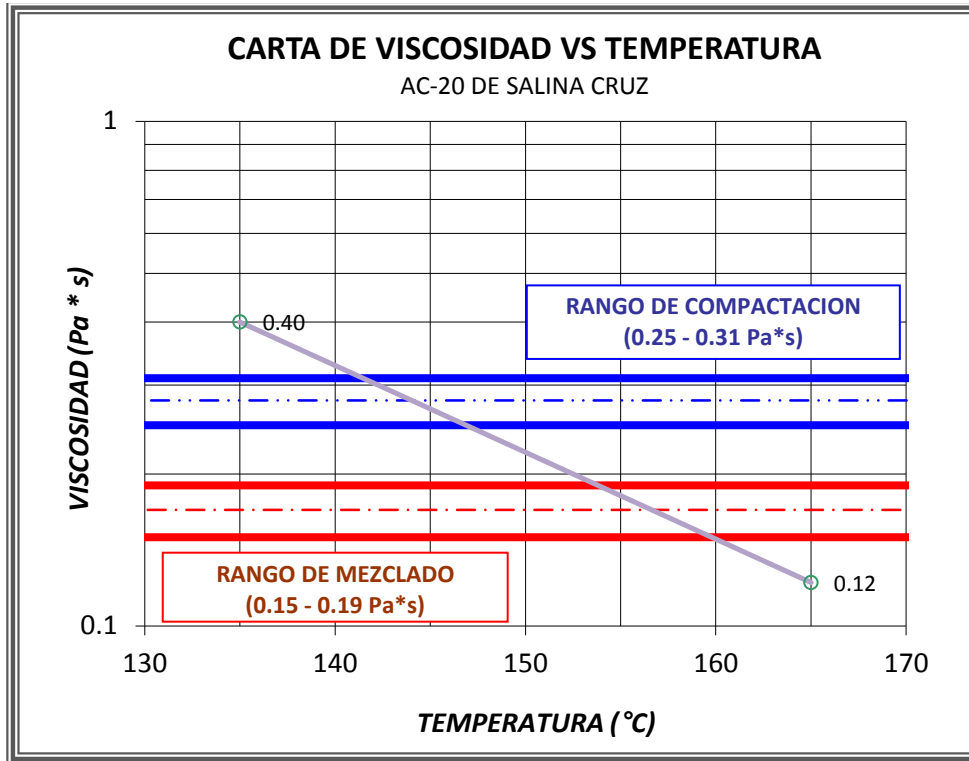


Fig. 3.8. Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto AC-20 de Salina Cruz.

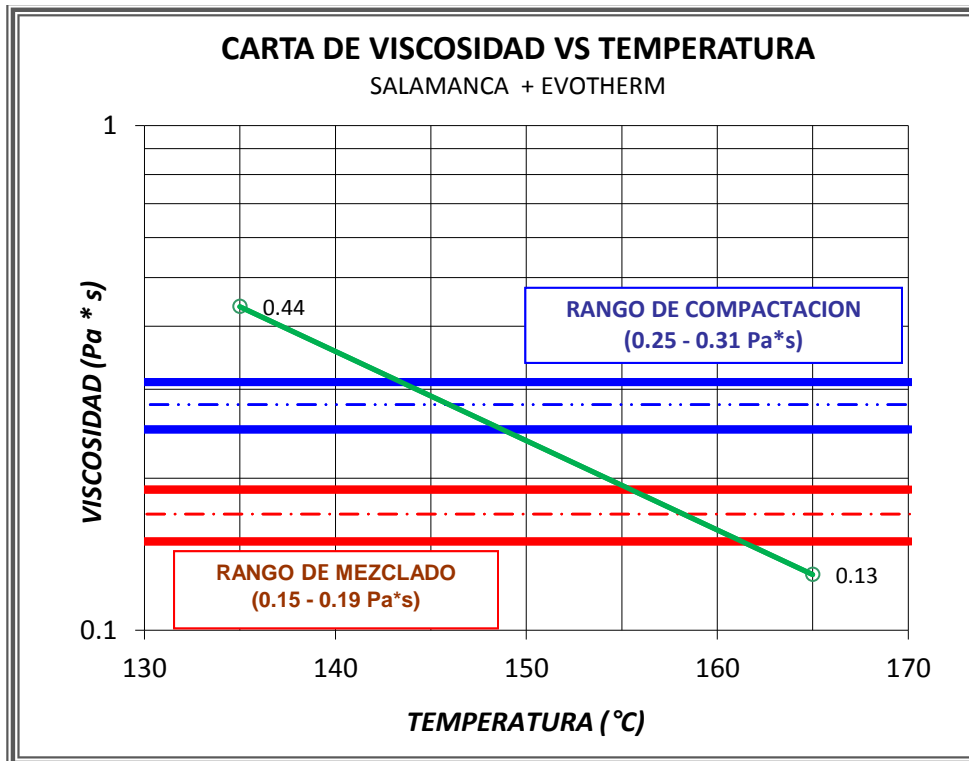


Fig. 3.9. Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto de Salamanca con aditivo Evotherm.

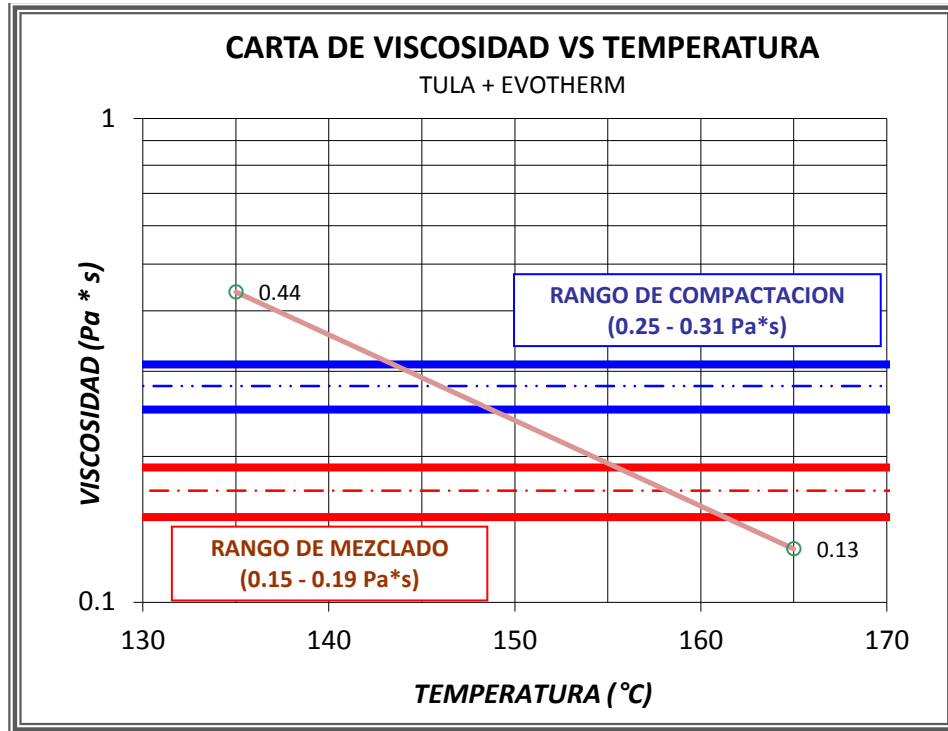


Fig. 3.10. Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto de Tula con aditivo Evotherm.

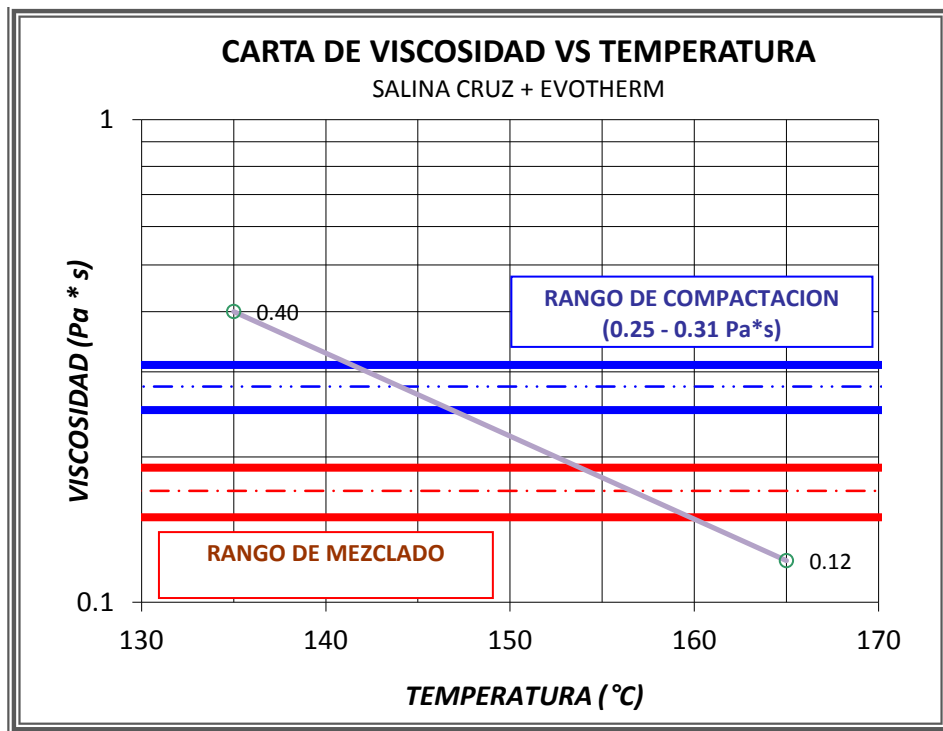


Fig. 3.11. Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto de Salina Cruz con aditivo Evotherm.

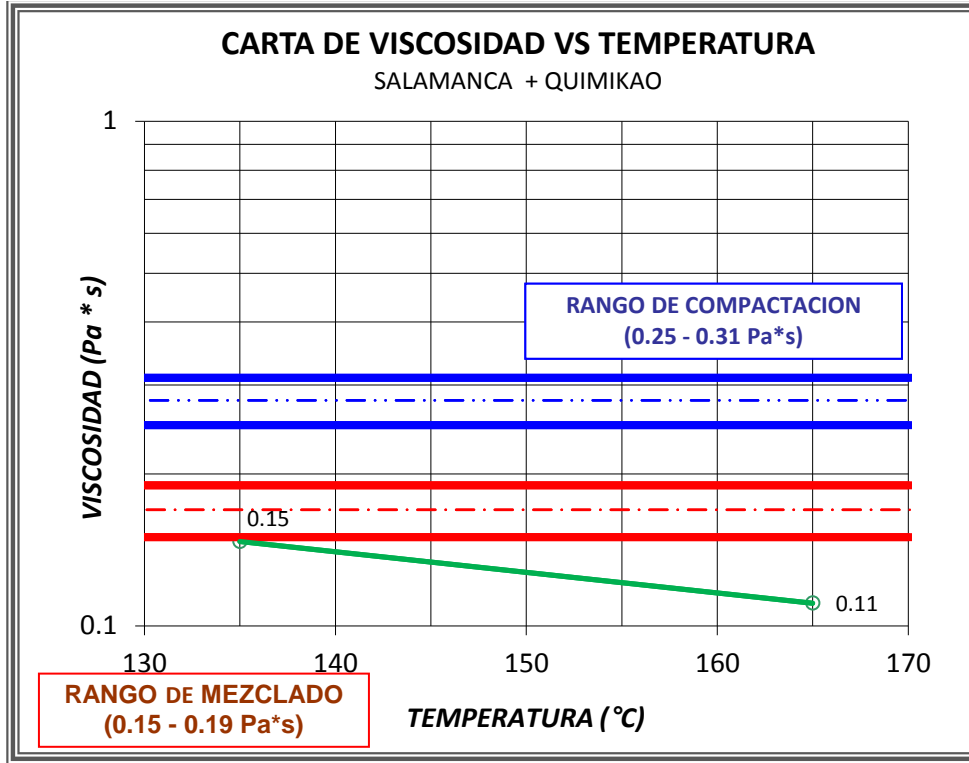


Fig. 3.12. Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto de Salamanca con aditivo Quimikao.

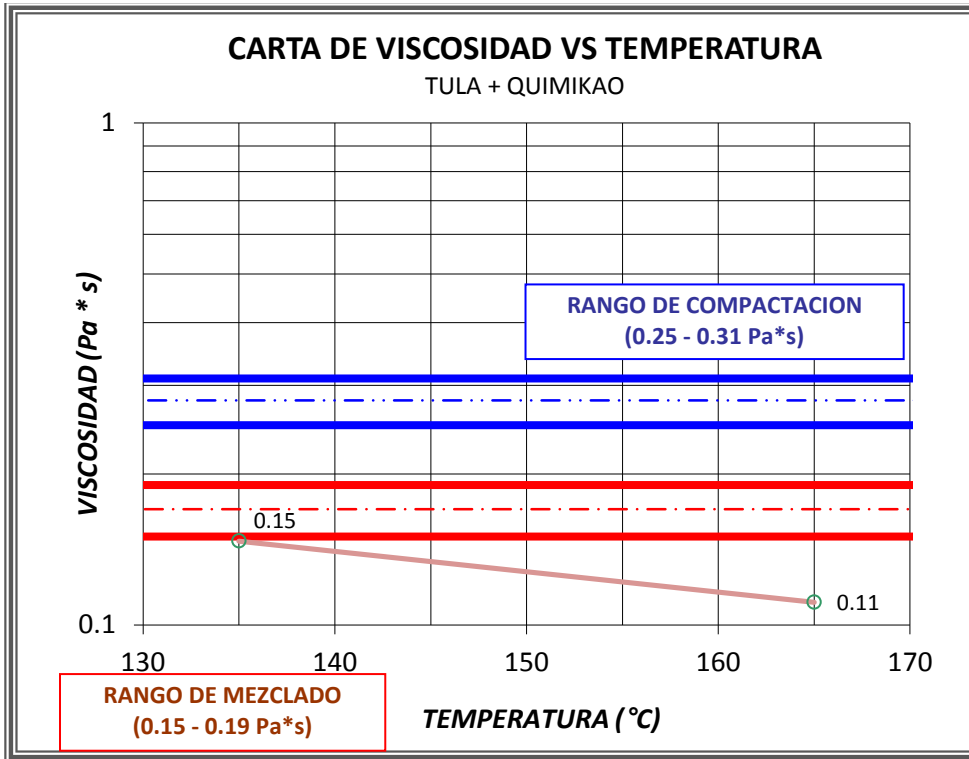


Fig. 3.13. Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto de Tula con aditivo Quimikao.

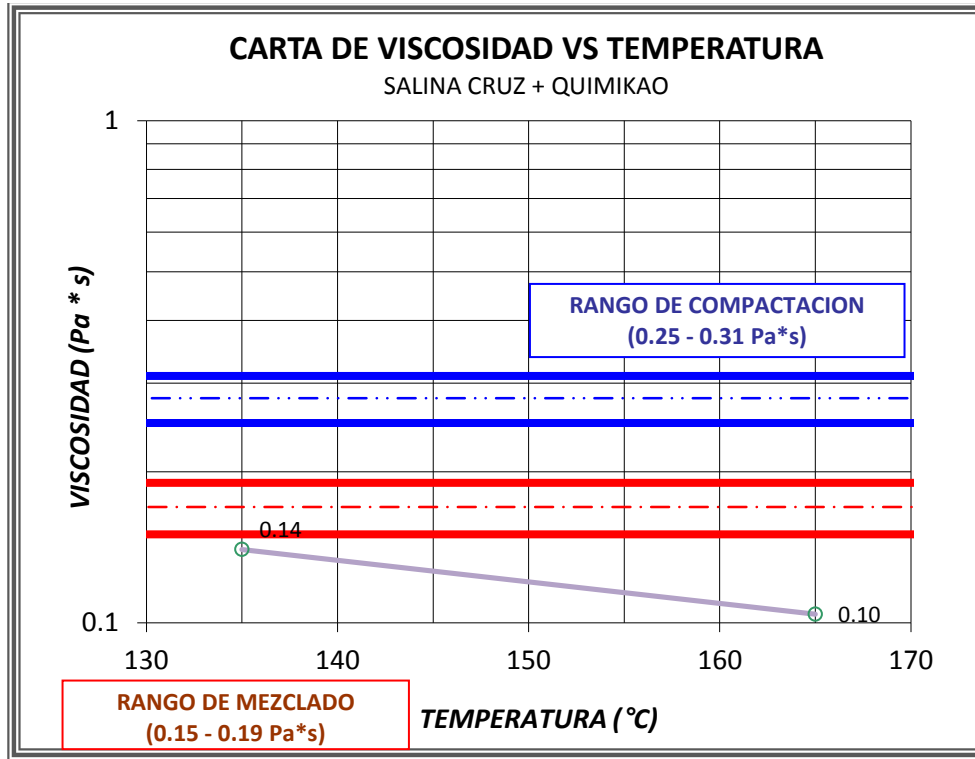


Fig. 3.14. Carta de viscosidad vs temperatura en asfalto de Salina Cruz con aditivo Quimikao.

### 3.4. DETERMINACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO A CORTO PLAZO

El envejecimiento del cemento asfáltico consta de dos mecanismos diferentes: volatilización de aceites ligeros presentes en el asfalto y oxidación por la reacción con el oxígeno del medio ambiente.

El mezclado y la agitación de la mezcla en caliente en planta y el envejecimiento durante la puesta en obra son dos mecanismos que envejecen al asfalto, debido a las altas temperaturas y al flujo de aire involucrado en el proceso. Las especificaciones Superpave usan el horno rotatorio de película delgada (RTFO) como procedimiento para simular este tipo de envejecimiento.



**Fig. 3.15.** Horno rotatorio de película delgada (RTFO)

El procedimiento del RTFO se utiliza para dos propósitos. Uno es proveer un envejecimiento al cemento asfáltico que puede usarse en pruebas posteriores de propiedades físicas. La segunda es determinar la cantidad de masa de aceites volátiles pérdida del asfalto durante el mezclado. La masa de aceites volátiles pérdida, es una indicación de que el envejecimiento pudiera ocurrir en el asfalto durante las operaciones de mezclado y construcción.

Se realizaron pruebas para simular el envejecimiento a corto plazo de los tres tipos de asfalto en sus diferentes fases, es decir se obtuvo el envejecimiento en el proceso de transporte, mezclado, tendido y compactación, utilizando el RTFO (Horno Rotatorio de Película Delgada).

#### **3.4.1. ELABORACIÓN DE LA PRUEBA**

- Se regula el RTFO a una temperatura de 163 °C.
- Se calienta la muestra de asfalto sin sobrepasar los 150 °C, para vaciarlo a los frascos que se colocarán en el RTFO. Se toma el peso inicial del frasco, y el peso del asfalto, para calcular la pérdida de masa.



**Fig. 3.16.** Peso del frasco y la muestra de asfalto para RTFO.

- Se colocan aproximadamente 35 gramos de asfalto en cada uno de los 6 frascos.



**Fig. 3.17.** Muestras de asfalto para RTFO.

- Se colocan los frascos dentro del horno RTFO, se enciende el carrusel que rota a una velocidad de  $15 \pm 2$  rpm, el flujo de aire es de  $4000 \pm 200$  ml/minuto. El ensayo dura 85 minutos.





Fig. 3.18. Colocación de las muestras de asfalto en el RTFO.

- Pasados los 85 minutos, que dura el ensayo, se retiraron los frascos del RTFO, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y después se tomó el peso de dos de ellos para determinar la pérdida de masa.



Fig. 3.19. Peso de las muestras después del RTFO.

### 3.4.2. RESULTADOS

Debido a que los ensayos de RTFO son considerados técnicas de envejecimiento, no se informan los resultados, con excepción de la pérdida de masa, luego del envejecimiento en el RTFO, la pérdida de masa se informa como el promedio de dos botellas. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Pérdida de masa (\%)} = \frac{\text{Peso original} - \text{Peso de la muestra envejecida}}{\text{Peso original}} \times 100$$

**Tabla 3.1.** Resultados del ensayo RTFO en asfaltos AC-20.

ENSAYO RTFO EN ASFALTOS AC-20	
ASFALTO	PÉRDIDA DE MASA (%)
Salamanca	2.72
Salina Cruz	1.01
Tula	-0.64

**Tabla 3.2.** Resultados del ensayo RTFO en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.

ENSAYO RTFO EN ASFALTOS AC-20	
ASFALTO	PÉRDIDA DE MASA (%)
Salamanca	2.88
Salina Cruz	1.26
Tula	1.22

### 3.5. DETERMINACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO A LARGO PLAZO

El envejecimiento que sufre el asfalto durante su vida útil en el pavimento es tomado en cuenta por primera vez en una especificación de asfaltos. Este equipo utiliza aire comprimido a alta presión (2070 KPa) y altas temperaturas (90, 100 o 110 °C) de manera para poder simular el envejecimiento a largo plazo (5 años) en tan solo 20 hrs de ensayo. Se utilizan muestras de asfalto previamente envejecidas con el RTFO, las cuales se colocan en recipientes que a su vez se colocan dentro de una vasija de acero inoxidable. La temperatura de ensayo varía según el clima de la región, la mayoría de las cuales admite 100 °C. El ensayo simula entre 5 y 10 años de envejecimiento en el campo. Las pruebas se realizan en PAV (Cámara de Envejecimiento a Presión).

El residuo del PAV representa un asfalto que ha sido expuesto a todas las condiciones del medio ambiente a las cuales está sujeto durante la producción y servicio.

### 3.5.1. ELABORACIÓN DE LA PRUEBA

- Se utilizó el asfalto resultante después del ensayo en el RTFO. Se colocó el contenido de los frascos en 3 charolas del PAV, en cada de las 3 charolas se pesan 50 gramos.



**Fig. 3.20.** Peso de las muestras de asfalto para PAV.

- Se enciende el horno, y se revisa la presión y la temperatura.



**Fig. 3.21.** Calibración del PAV para iniciar la prueba.

- Se colocan las charolas del PAV en el bastidor, para después introducir el bastidor con las charolas en la cámara caliente.



**Fig. 3.22.** Colocación de las charolas con las muestras de asfalto para prueba del PAV.

- Se coloca la tapa y se ajusta el sistema de cierre. Estos pasos se realizaron lo más rápido que fue posible para evitar una excesiva pérdida de calor en la cámara.



**Fig. 3.23.** Colocación de la tapa del PAV.

- Una vez que se cierra la cámara, la manguera de presión y el sensor de temperatura se acoplan en sus respectivas posiciones. Cuando la temperatura de la cámara difiere en no más de 2 °C con respecto a la temperatura de ensayo, se inyecta aire a presión, utilizando la válvula en el regulador del cilindro de aire comprimido. Alcanzada la presión, el ensayo comienza y durará 20 horas.



**Fig. 3.24.** Calibración de la presión del PAV para inicio de la prueba.

- Luego de 20 horas de despresurizó lentamente utilizando la válvula de purga. Se requirieron aproximadamente 10 minutos para liberar la presión. Se abre la cámara, de retira el bastidor con las bandejas y se colocan en un horno a 163 °C por 30 minutos. Para eliminar el aire atrapado en las muestras.



**Fig. 3.25.** Extracción de las charolas del PAV después de la prueba y colocación dentro del horno para eliminar el aire atrapado en el asfalto.

**3.5.2. RESULTADOS**

Debido a que los ensayos de PAV son considerados técnicas de envejecimiento, no se informan los resultados, con excepción de la pérdida de masa, luego del envejecimiento en el PAV, la pérdida de masa se informa como el promedio de dos botellas. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Pérdida de masa (\%)} = \frac{\text{Peso original} - \text{Peso de la muestra envejecida}}{\text{Peso original}} \times 100$$

**Tabla 3.3.** Resultados del ensayo PAV en asfaltos AC-20.

ENSAYO PAV EN ASFALTOS AC-20	
ASFALTO	PÉRDIDA DE MASA (%)
Salamanca	2.72
Salina Cruz	1.01
Tula	-0.64

**Tabla 3.4.** Resultados del ensayo PAV en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.

ENSAYO PAV EN ASFALTOS + QUIMIAKO	
ASFALTO	PÉRDIDA DE MASA (%)
Salamanca	2.88
Salina Cruz	1.26
Tula	1.22



### 3.6. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

Esta prueba evalúa los efectos que ocasionan el tiempo y la temperatura en el comportamiento del asfalto.

Con el reómetro de corte dinámico (DSR) de deformación controlada se determina el módulo complejo y el ángulo de fase. Este método de ensayo permite evaluar el comportamiento visco-elástico de los ligantes bituminosos, gracias a la medida del módulo complejo,  $G^*$ , que indica la relación entre la carga aplicada al material y la deformación experimentada por éste, y el ángulo de fase,  $\delta$ , que da idea de la deformación recuperable y no recuperable del ligante.



Fig. 3.26. Reómetro de corte dinámico (DSR).

Estos parámetros son calculados por el software propio del reómetro tras la aplicación de un movimiento oscilatorio sobre la muestra, que está colocada entre dos platos paralelos (el plato inferior fijo y el plato superior móvil) y con un espesor de película determinado, a diferentes frecuencias y temperaturas de ensayo.

La temperatura de la muestra se mantiene constante entre los dos platos paralelos, gracias a un baño de agua que rodea completamente a la muestra durante todo el ensayo.

### 3.6.1. ELABORACIÓN DE LA PRUEBA

Para el ensayo, se necesita un disco de asfalto de diámetro igual al del plato oscilatorio, para esto se utilizó un molde en el cual se coloca el asfalto.



Fig. 3.27. Muestras para ensayo en DSR.

- Se toma la muestra del molde y se coloca en el plato.



Fig. 3.28. Colocación de la muestra en DSR para ensayo.



- Se ajusta la separación entre los dos platos a 50 micrones y se limpia el exceso que resulte entre los dos platos.



**Fig. 3.29.** Ajuste de platos en DSR para ensayo.

- Se baja la tapa que cubrirá los platos y la muestra y que permitirá conservar las temperaturas de prueba.



**Fig. 3.30.** Colocación de tapa en DSR para ensayo.

- Se inicia el ensayo, utilizando el software del reómetro, indicando las temperaturas de ensayo.



**Fig. 3.31.** Inicio de la prueba en el DSR.

- Una vez que se concluye el ensayo, se levanta la tapa, para posteriormente limpiar el equipo.

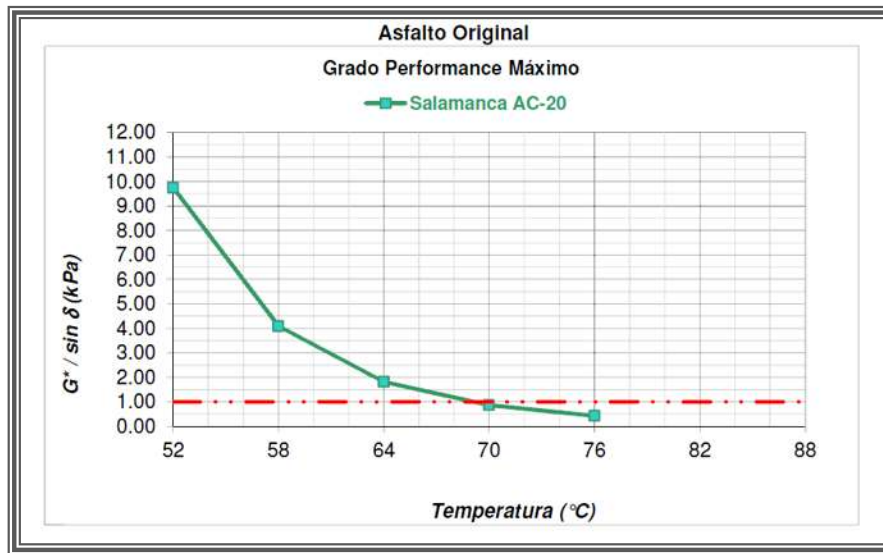


**Fig. 3.32.** Terminación de prueba en el DSR.

**3.6.2. RESULTADOS**

**Tabla 3.5.** Resultados del ensayo DSR en asfalto AC-20 de Salamanca.

ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA							
TEMPERATURA °C	ORIGINAL		DESPUÉS DEL RTFO		DESPUÉS DEL PAV		
	G*/sin δ kPa	δ grados	G*/sin δ kPa	δ grados	Temperatura °C	G* sin δ kPa	δ grados
52	9.7410	82.3400	52.6900	74.1100	31	1091.00	45.69
58	4.0900	84.3400	21.8100	77.1400	28	1561.00	43.37
64	1.8170	86.1200	9.2700	80.0200	25	2240.00	40.98
70	0.8606	87.3500	4.1280	82.5400	22	3154.00	38.65
76	0.4311	88.0900	1.9390	84.6400	19	4374.00	36.30
					16	5940.00	34.06
	G*/sin δ Mínimo 1.0 kPa		G*/sin δ Mínimo 2.2 kPa		G* sin δ Máximo 5000 kPa		
<b>CLASIFICACIÓN PG 64 -10</b>							



**Fig. 3.33.** Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Salamanca.

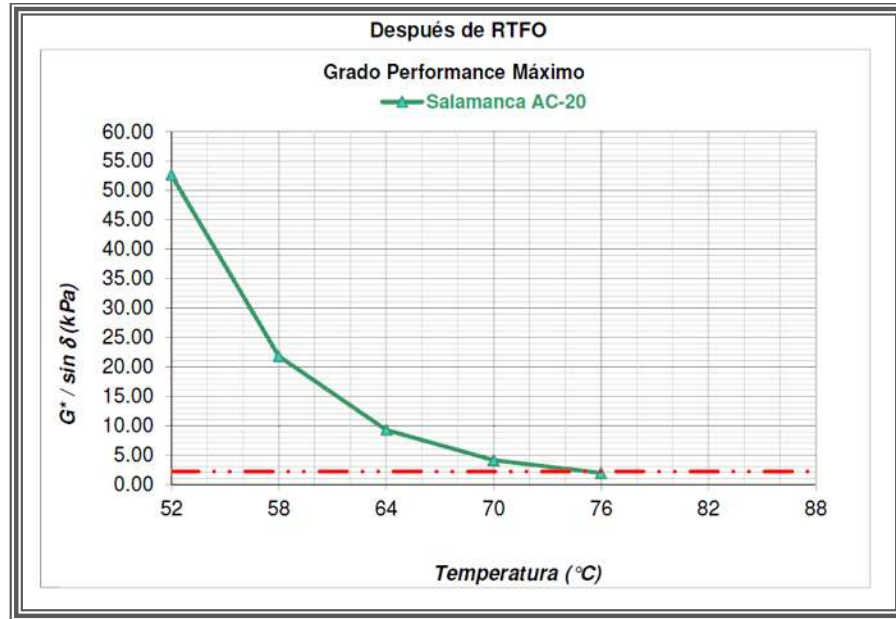


Fig. 3.34. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Salamanca después del RTFO.

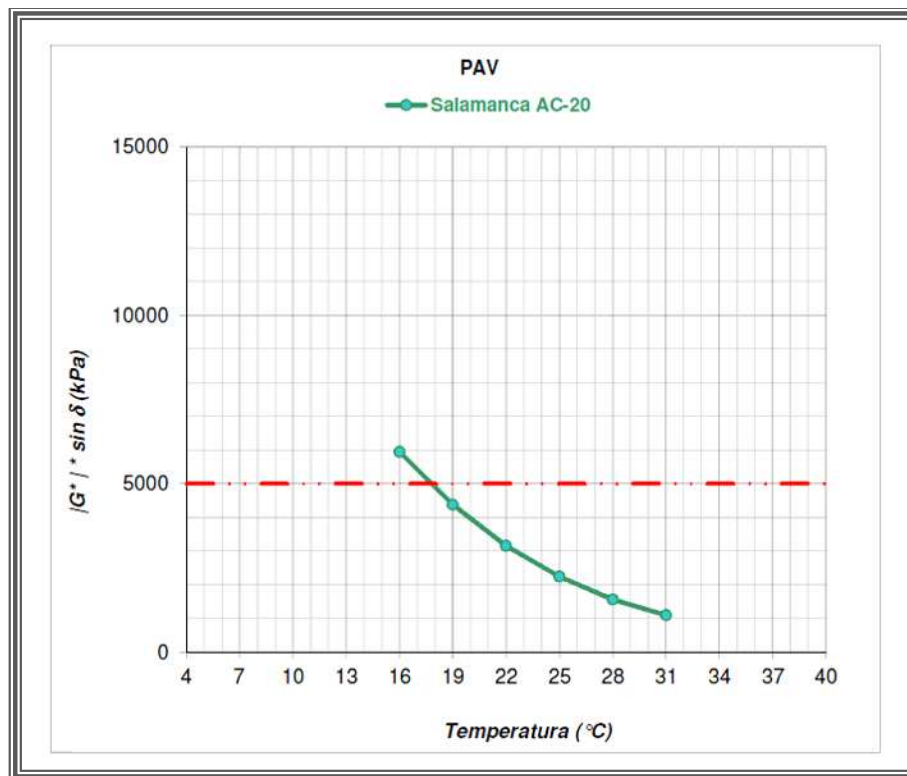


Fig. 3.35. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Salamanca después del PAV.

Tabla 3.6. Resultados del ensayo DSR en asfalto AC-20 de Tula.

ASFALTO AC-20 DE TULA							
TEMPERATURA °C	ORIGINAL		DESPUÉS DEL RTFO		DESPUÉS DEL PAV		
	G*/sin δ kPa	δ grados	G*/sin δ kPa	δ grados	Temperatura °C	G* sin δ kPa	δ grados
52	4.0610	75.9200	15.1000	66.9900	31	1831.00	40.42
58	2.1060	77.4400	7.9000	67.1900	28	2542.00	38.30
64	1.1670	78.3900	4.6100	66.8100	25	3470.00	36.40
70	0.7500	78.1800	2.9670	65.7400	22	4694.00	34.49
76	0.5003	76.9300	2.1000	63.0800	19	6267.00	32.68
					16	5940.00	34.06
	G*/sin δ Mínimo 1.0 kPa		G*/sin δ Mínimo 2.2 kPa		G* sin δ Máximo 5000 kPa		
<b>CLASIFICACIÓN PG 64 -10</b>							

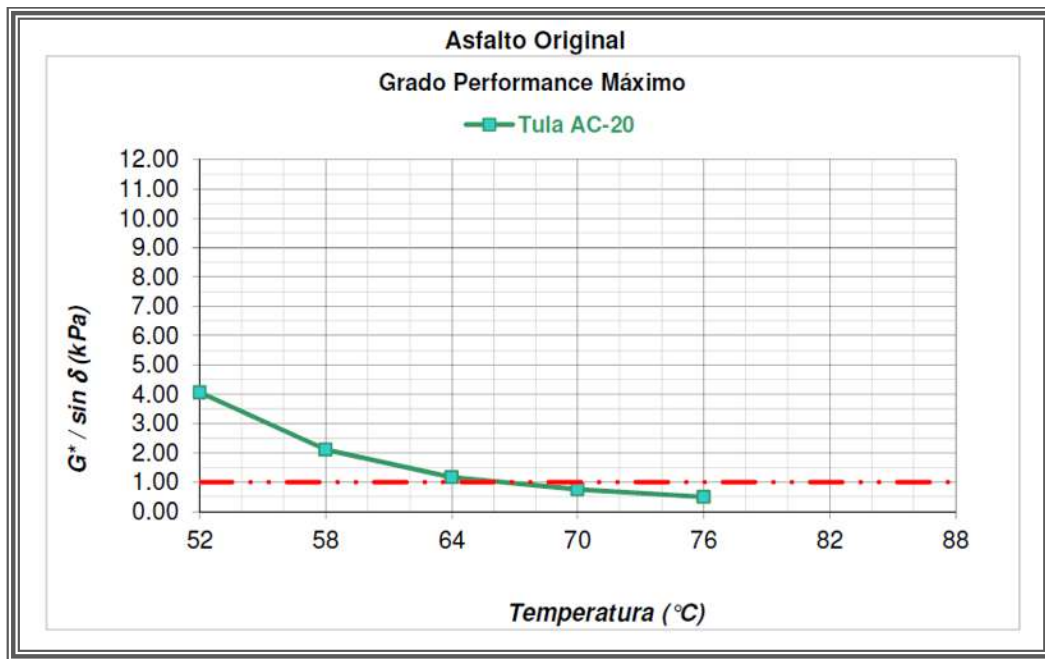


Fig. 3.36. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Tula.

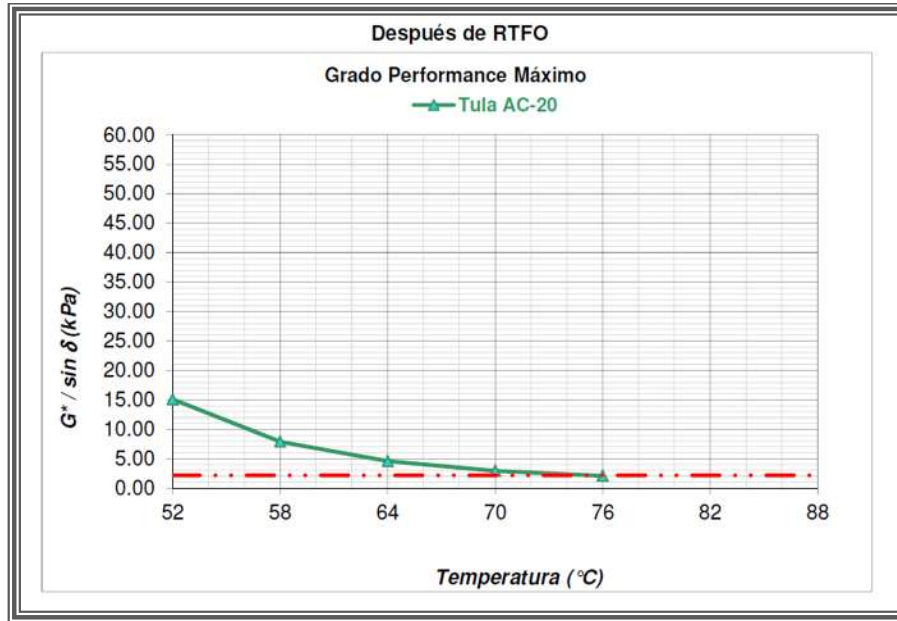


Fig. 3.37. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Tula después del RTFO.

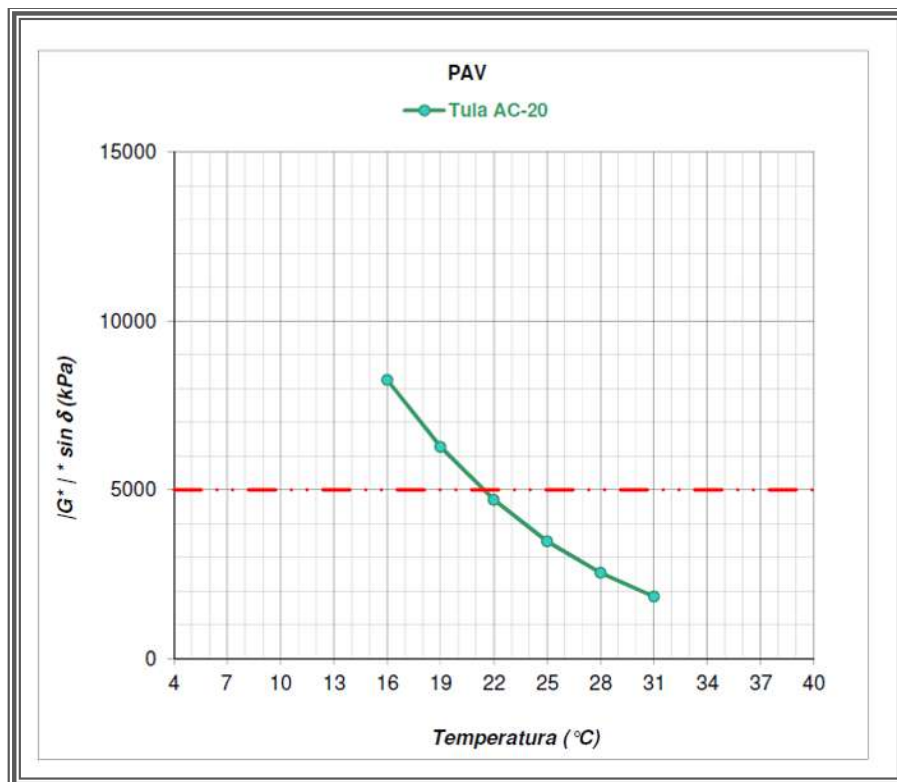
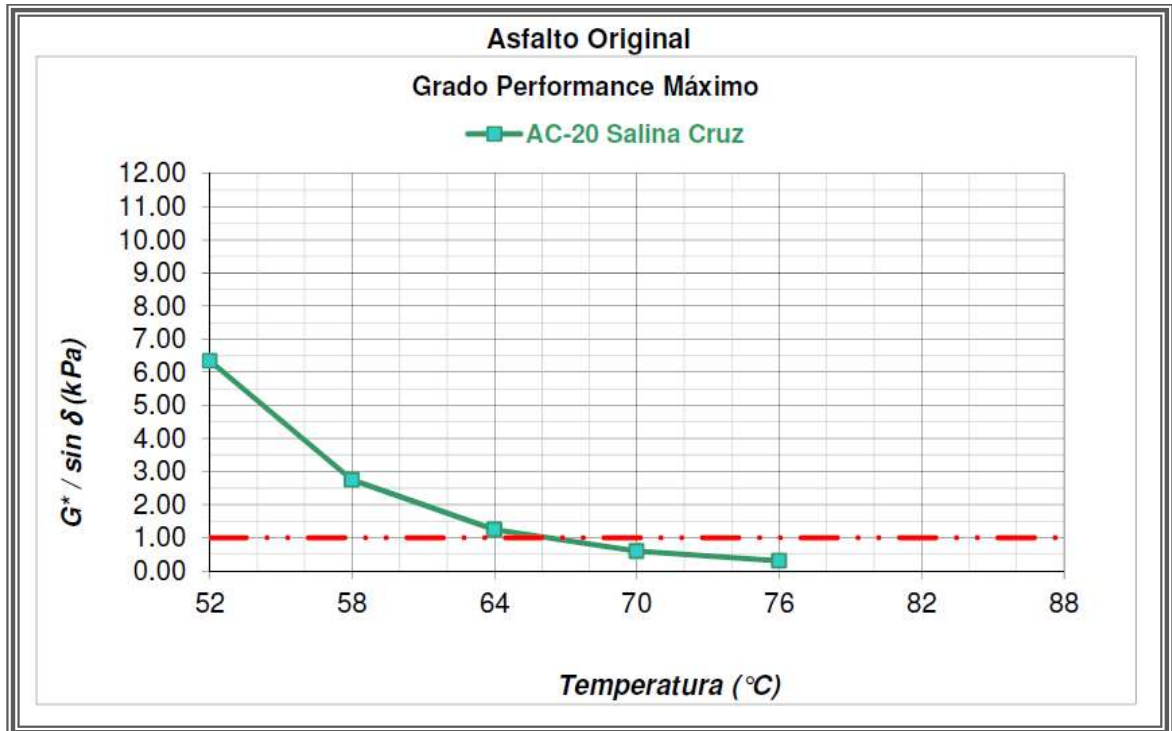


Fig. 3.38. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Tula después del PAV.

**Tabla 3.7.** Resultados del ensayo DSR en asfalto AC-20 de Salina Cruz.

ASFALTO AC-20 DE SALINA CRUZ							
TEMPERATURA °C	ORIGINAL		DESPUÉS DEL RTFO		DESPUÉS DEL PAV		
	G*/sin δ kPa	δ grados	G*/sin δ kPa	δ grados	Temperatura °C	G* sin δ kPa	δ grados
52	6.3470	78.7000	20.6500	70.2800	31	1484.00	41.67
58	2.7470	81.5900	9.0200	73.8300	28	2087.00	39.61
64	1.2430	84.0000	4.0500	77.2200	25	2881.00	37.67
70	0.5975	85.9000	1.8880	80.2700	22	3947.00	35.75
76	0.9061	87.3700	0.9150	82.8100	19	5311.00	33.93
	G*/sin δ Mínimo 1.0 kPa		G*/sin δ Mínimo 2.2 kPa		16	7115.00	32.17
	G* sin δ Máximo 5000 kPa						
CLASIFICACIÓN PG 70 -22							



**Fig. 3.39.** Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Salina Cruz.



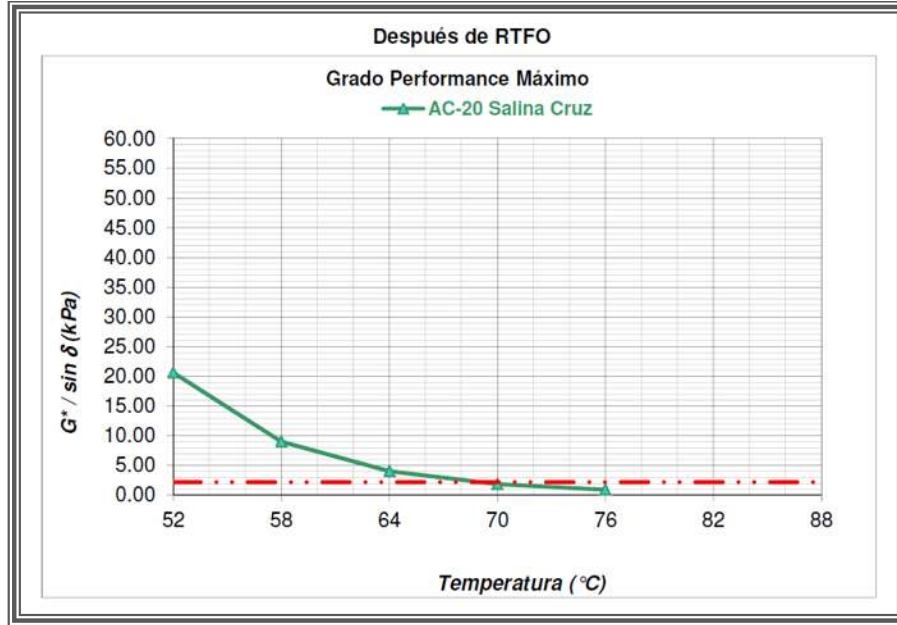


Fig. 3.40. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Salina Cruz después del RTFO.

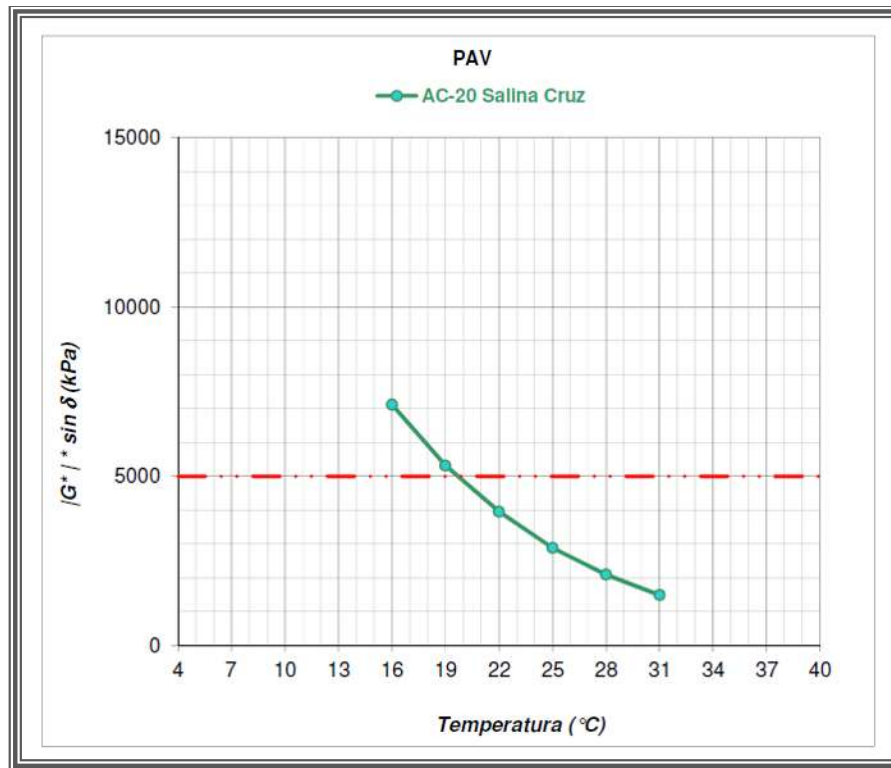
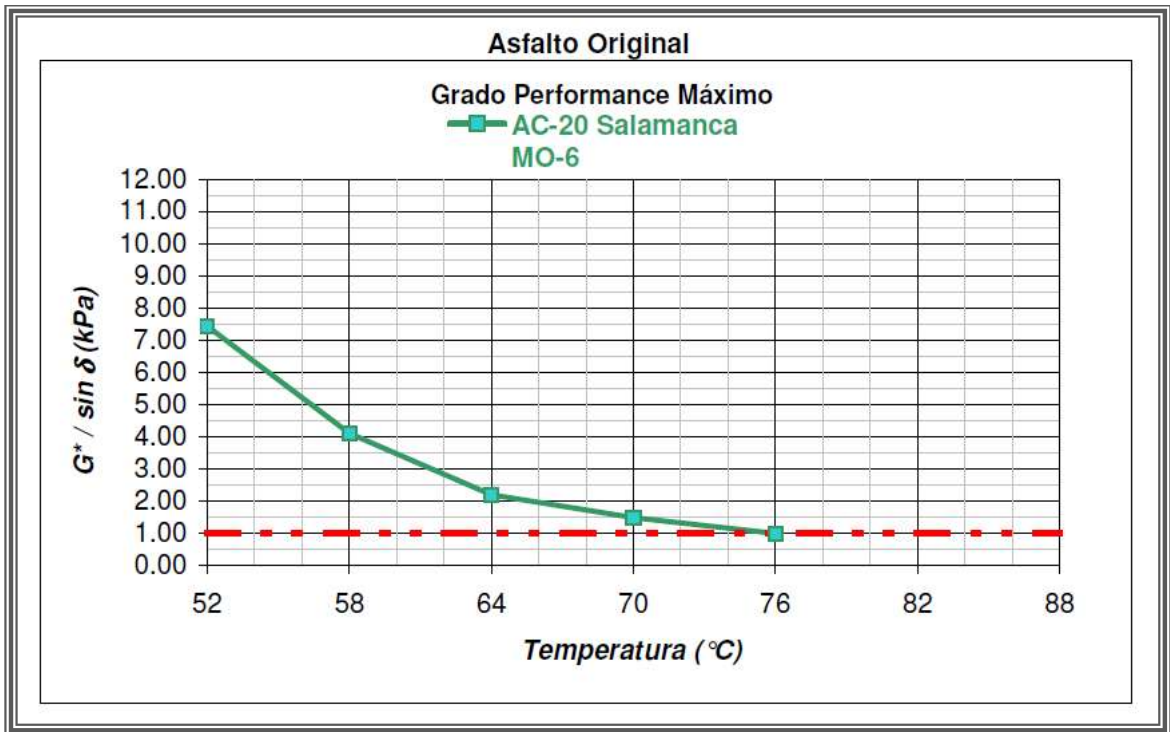


Fig. 3.41. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto AC-20 de Salina Cruz después del PAV.



**Tabla 3.8.** Resultados del ensayo DSR en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.

ASFALTO SALAMANCA + QUIMIKAO							
TEMPERATURA °C	ORIGINAL		DESPUÉS DEL RTFO		DESPUÉS DEL PAV		
	G*/sin δ kPa	δ grados	G*/sin δ kPa	δ grados	Temperatura °C	G* sin δ kPa	δ grados
52	7.4390	70.68	21.830	72.49	34	852.00	61.12
58	4.1009	67.80	10.770	72.69	31	1369.00	58.74
64	2.2020	70.00	5.840	72.47	28	2177.00	56.19
70	1.4850	67.12	3.457	71.35	25	3434.00	53.22
76	0.9960	63.14	2.182	69.55	22	5335.00	49.95
	G*/sin δ Mínimo 1.0 kPa		G*/sin δ Mínimo 2.2 kPa		19	8116.00	46.46
	G* sin δ Máximo 5000 kPa						
	CLASIFICACIÓN PG 70 -22						



**Fig. 3.42.** Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Salamanca con aditivo Quimikao.

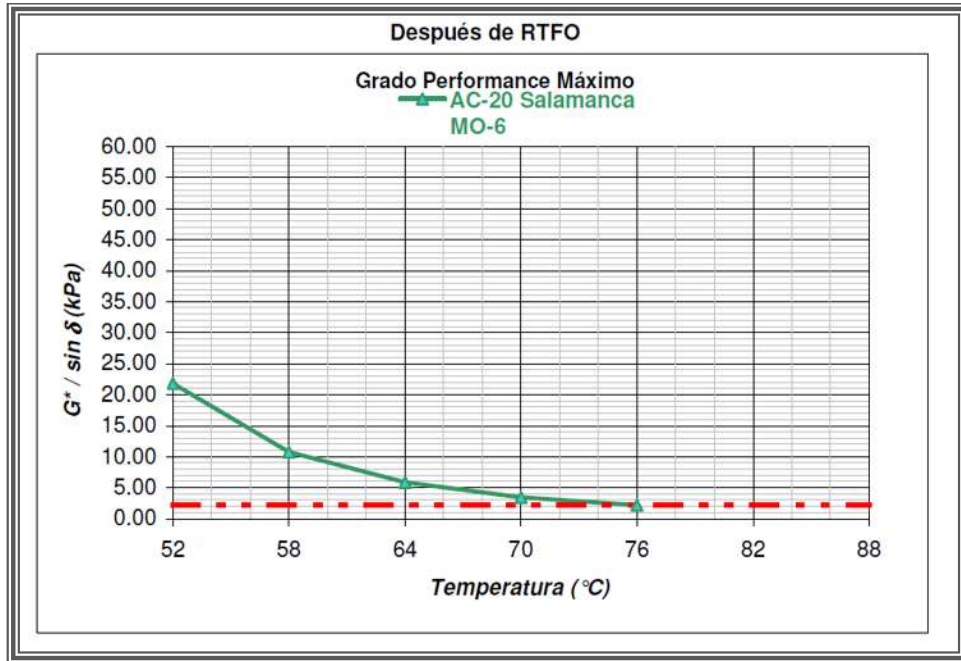


Fig. 3.43. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Salamanca con aditivo Quimikao después del RTFO.

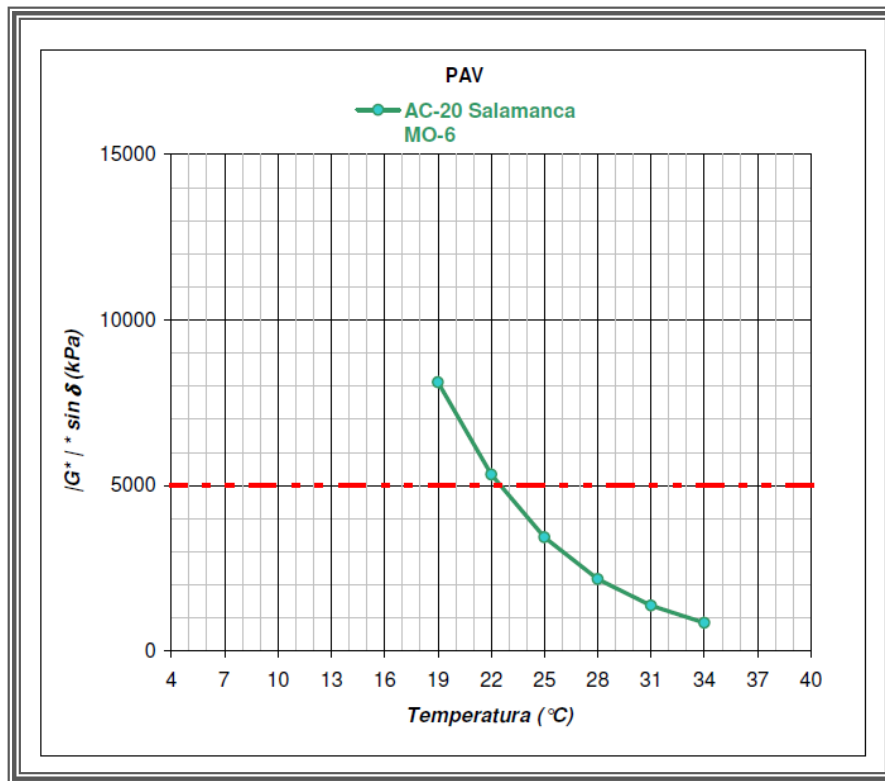


Fig. 3.44. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Salamanca con aditivo Quimikao después del PAV.

Tabla 3.9. Resultados del ensayo DSR en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.

ASFALTO TULA + QUIMIKAO							
TEMPERATURA °C	ORIGINAL		DESPUÉS DEL RTFO		DESPUÉS DEL PAV		
	G*/sin δ kPa	δ grados	G*/sin δ kPa	δ grados	Temperatura °C	G* sin δ kPa	δ grados
52	69.9690	66.18	15.3400	66.48	34	313.00	55.58
58	3.9190	65.68	8.1690	66.21	31	481.00	53.26
64	2.1570	66.77	4.7850	65.51	28	744.00	50.86
70	1.5040	64.58	3.1050	64.13	25	1132.00	48.51
76	1.1840	60.22	1.9980	61.67	22	1699.00	46.09
	G*/sin δ Mínimo 1.0 kPa		G*/sin δ Mínimo 2.2 kPa		19	2486.00	43.62
	G* sin δ Máximo 5000 kPa						
CLASIFICACIÓN PG 20 -22							

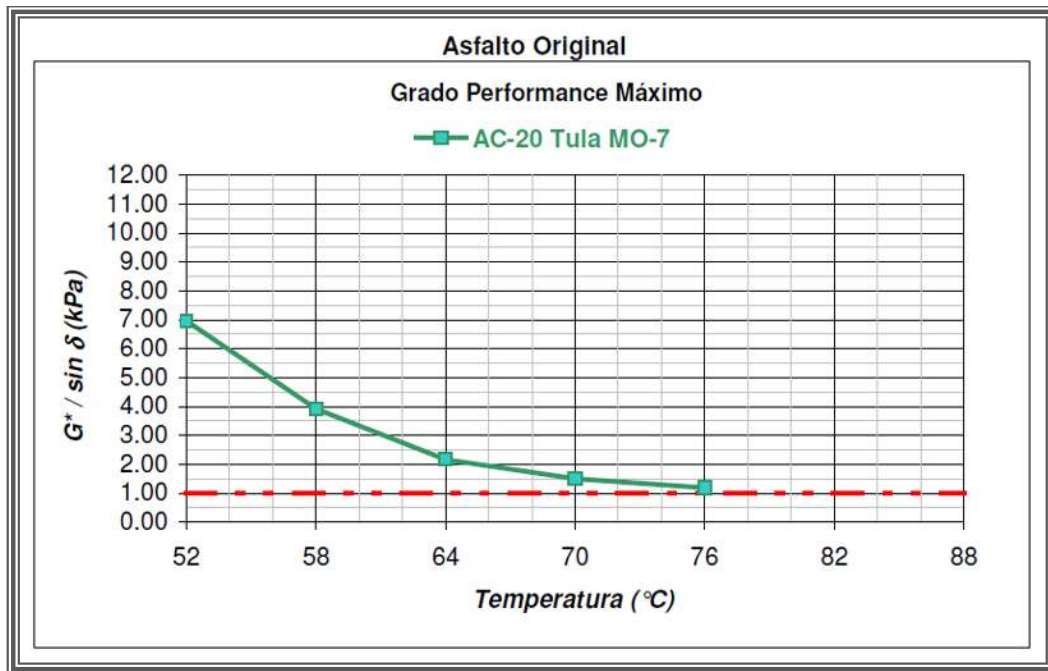


Fig. 3.45. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Tula con aditivo Quimikao.

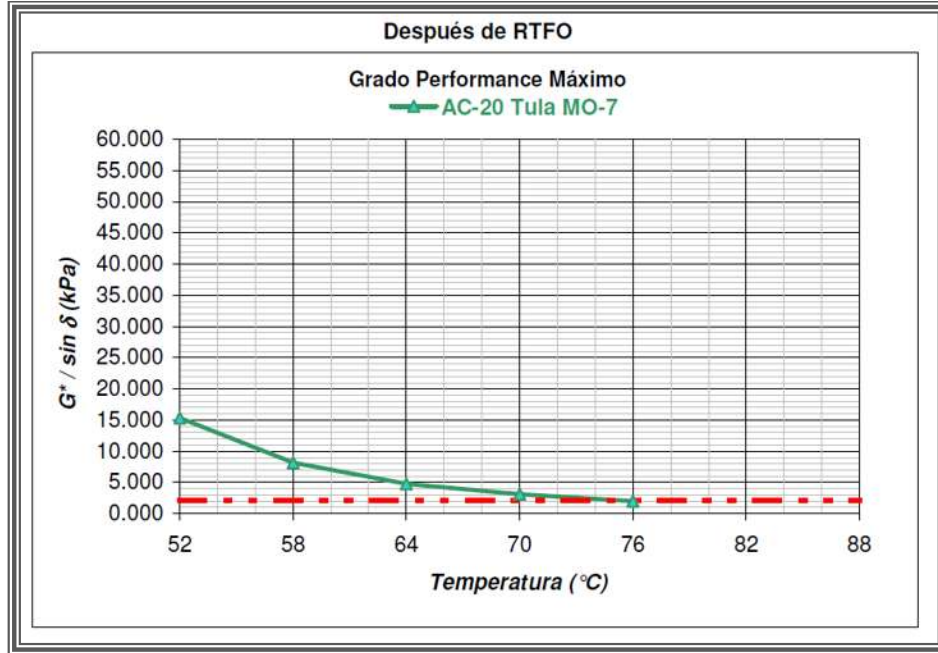


Fig. 3.46. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Tula con aditivo Quimikao después del RTFO.

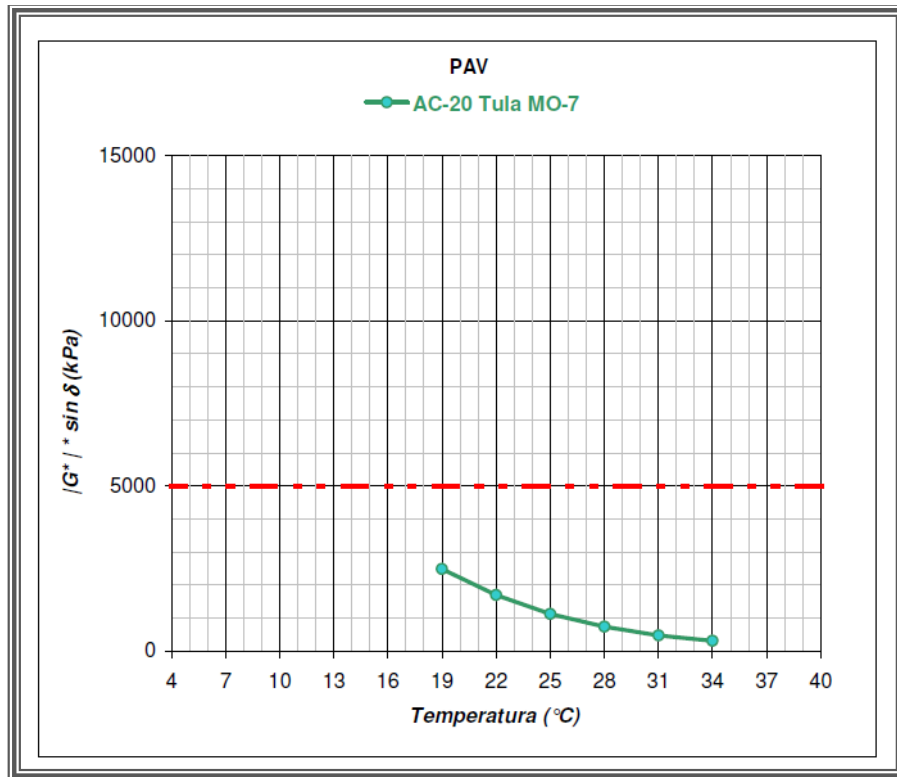
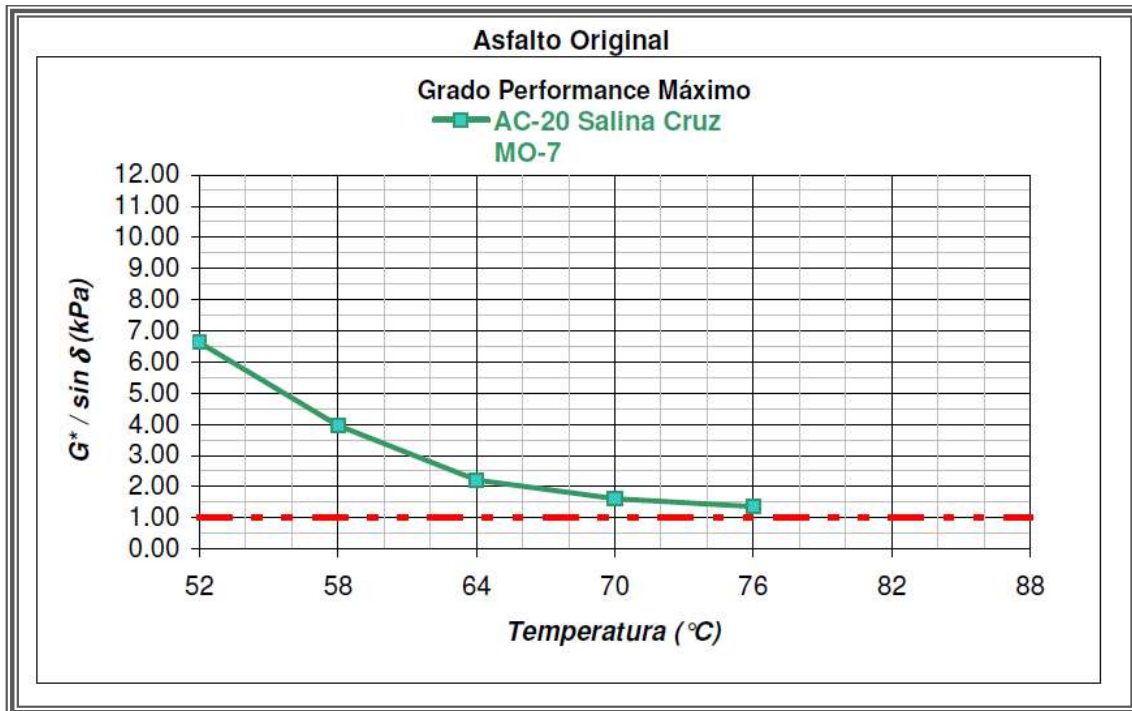


Fig. 3.47. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Tula con aditivo Quimikao después del PAV.

**Tabla 3.10.** Resultados del ensayo DSR en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.

ASFALTO SALINA CRUZ + QUIMIKAO							
TEMPERATURA °C	ORIGINAL		DESPUÉS DEL RTFO		DESPUÉS DEL PAV		
	G*/sin δ kPa	δ grados	G*/sin δ kPa	δ grados	Temperatura °C	G* sin δ kPa	δ grados
52	6.6190	64.17	11.6100	66.94	34	318.00	54.02
58	3.9580	62.68	6.2060	67.08	31	484.00	51.88
64	2.2060	64.26	3.6240	67.16	28	750.00	49.35
70	1.6080	61.49	2.4820	65.00	25	1139.00	46.93
76	1.3540	56.47	1.8260	61.68	22	1698.00	44.51
	G*/sin δ Mínimo 1.0 kPa		G*/sin δ Mínimo 2.2 kPa		19	2470.00	42.04
	G* sin δ Máximo 5000 kPa						
	CLASIFICACIÓN PG 70 -22						



**Fig. 3.48.** Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Salina Cruz con aditivo Quimikao.

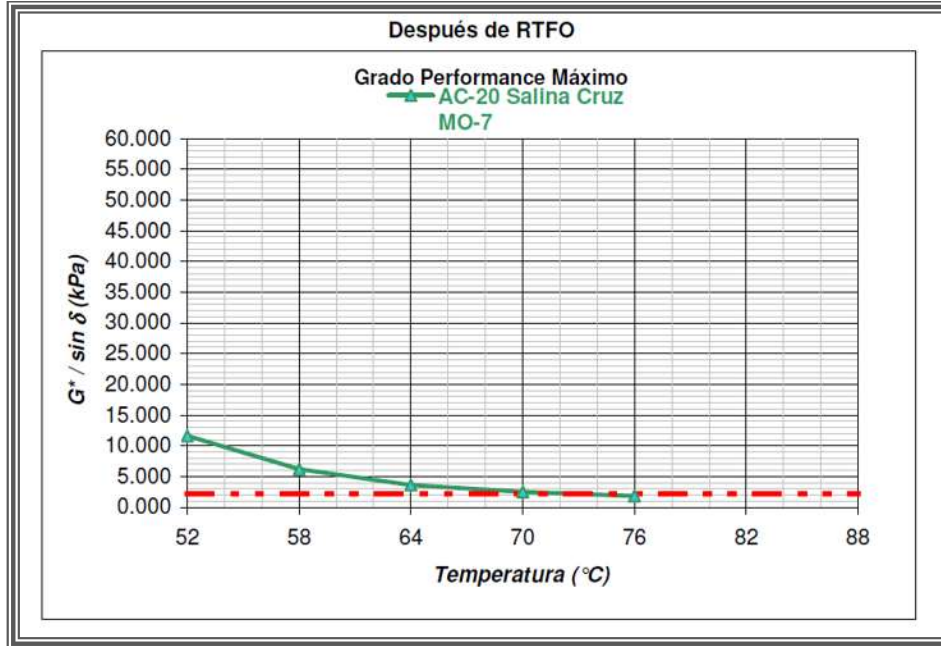


Fig. 3.49. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Salina Cruz con aditivo Quimikao después del RTFO.

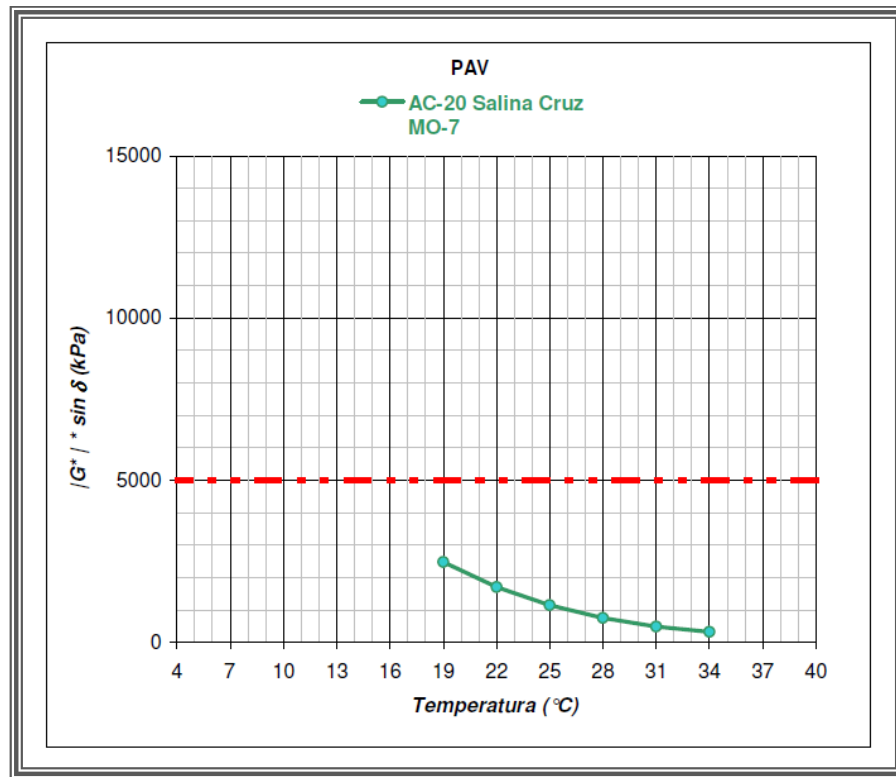


Fig. 3.50. Resultados de la prueba en el DSR en asfalto de Salina Cruz con aditivo Quimikao después del PAV.

## **CAPÍTULO 4.-**

# **CARACTERIZACIÓN DE LOS DIFERENTES ASFALTOS ESTUDIADOS MEDIANTE EL MÉTODO UCL<sup>®</sup>**

El Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL<sup>®</sup>), fue desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña por los Doctores Félix Edmundo Pérez Jiménez y Jorge Rodrigo Miro Recasens, está basado en la aplicación del ensayo Cántabro de pérdidas por desgaste, es un procedimiento directo y sencillo que evalúa las propiedades funcionales del ligante a partir de la determinación del grado de cohesión que proporciona a una mezcla patrón y de la observación de cómo esta cualidad varía con la temperatura evaluando la susceptibilidad térmica, la adherencia agregado-cemento asfáltico. Es una tecnología de fácil ejecución y que ofrece una novedosa herramienta para clasificar y cotejar los distintos asfaltos que podrían utilizarse en una determinada obra de pavimentación, pues permite diferenciar el comportamiento de ligantes, incluso aquellos que poseen propiedades similares según la caracterización tradicional y además, manifestar las diferencias entre diversos asfaltos-polímeros entre sí, y entre estos y los convencionales.

A este procedimiento se le dio el nombre de Universal por ser aplicable a cualquier asfalto. El principio del mismo es comparar directamente las respuestas de estos materiales como parte integrante de una mezcla asfáltica, exaltando sus diferencias relativas y las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Se evalúan cuatro propiedades funcionales que los ligantes han de aportar al comportamiento de las mezclas asfálticas: Cohesión, susceptibilidad térmica, adhesividad y resistencia al envejecimiento.

El método UCL<sup>®</sup> permite controlar dos propiedades fundamentales de los ligantes para su uso en mezclas bituminosas: la cohesión y la tenacidad que proporcionan a la mezcla, así como la variación de estas dos propiedades con la temperatura, curva de estado. Permite también analizar y valorar otras dos propiedades básicas para el buen comportamiento de la mezcla: adhesividad árido-ligante y el envejecimiento del ligante.

#### **4.1. ANTECEDENTES**

Enseguida se describen las propiedades funcionales que evalúa el Método UCL<sup>®</sup>

##### **1. Cohesión-temperatura: Curva de estado del ligante**

Variando la temperatura a la que se realiza el ensayo cántabro puede obtenerse la curva de estado del ligante, que puede considerarse como su curva de identidad, ya que define la variación de su comportamiento, desde inconsistente a altas temperaturas, a frágil a bajas temperaturas. La mayor o menor pendiente de esta curva de estado nos indica la susceptibilidad del ligante a los cambios de temperatura y está relacionada con su índice de penetración.

##### **2. Susceptibilidad térmica**

Los ligantes bituminosos se caracterizan por tener un comportamiento frágil a bajas temperaturas, un comportamiento elasto-plástico a temperaturas medias y un comportamiento inconsistente a temperaturas altas.

Esta variación del comportamiento del ligante con la temperatura puede ser evaluada y cuantificada mediante el empleo del Método UCL<sup>®</sup>. La determinación en condiciones especiales, de las pérdidas por desgaste a distintas temperaturas, pone de manifiesto el comportamiento frágil del ligante, altas pérdidas al cántabro, y sus inconsistencias, fuerte incremento de las pérdidas.



### **3. Adhesividad agregado-ligante o susceptibilidad a la humedad.**

El ligante asfáltico debe ser capaz de envolver a los agregados pétreos, dando cohesión a la mezcla y debe resistir la acción de desenvuelta del agua. Por efecto del agua, el ligante se separa del árido y disminuye la cohesión de la mezcla.

Mediante el Método UCL<sup>®</sup> se puede valorar la adhesividad agregado-ligante, determinando las pérdidas de la mezcla cuando ésta se ensaya en seco a tras permanecer cierto tiempo sumergida en agua. El incremento de las pérdidas, está relacionado con la mejor o peor adhesividad del ligante con el agregado.

### **4. Envejecimiento.**

La valoración por el envejecimiento por el Método UCL<sup>®</sup> se basa en determinar la evolución de la resistencia a la disgregación de la mezcla, pérdidas al cántabro, a medida que se va produciendo el envejecimiento del ligante. Dada la alta porosidad de la granulometría empleada, el asfalto envuelve las partículas del pétreo con una película muy fina.

Este efecto de envejecimiento se puede simular ya acelerar en el laboratorio y mediante el Método UCL<sup>®</sup> evaluar cómo va afectando a las características del ligante. Se obtiene así una curva de pérdidas al cántabro-tiempo de envejecimiento, claramente relacionada con el endurecimiento del ligante.

El procedimiento UCL<sup>®</sup> para determinar la cohesión del ligante consiste en fabricar una mezcla patrón, compuesta por 1000 g de agregado pétreo -80 % del tamaño 2.5/5 mm y 20 % del tamaño 0.63/2.5, tamices UNE- y 45 g de ligante a caracterizar, y elaborar con ella, según la NLT-352/86, una probeta Marshall que se ensaya en la máquina de desgaste de Los Ángeles sin carga abrasiva. Después de someterla a 300 revoluciones del tambor se determinará su pérdida de peso, en %, referido al peso inicial de la probeta.

El Método UCL<sup>®</sup> consiste en introducir en la Máquina de los Ángeles, un probeta tipo Marshall fabricada con una mezcla patrón formada por el 80 % de material pétreo retenido en la malla No. 8 y un 20 % de material pétreo retenido en la malla No. 30 y un 4.5 % de material asfáltico. Las probetas son introducidas en la máquina de los Ángeles sin colocar carga abrasiva.

Durante el ensayo se van desprendiendo por impacto y abrasión los áridos más superficiales de la probeta, determinándose, tras cumplirse 300 revoluciones, la pérdida de peso de la probeta referida en tanto por ciento del peso inicial, de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$Pd = \frac{Pi - Pf}{Pi} * 100$$

Donde:

**Pd = Pérdidas por desgaste (%)**

**Pi = Peso inicial (g)**

**Pf = Peso final (g)**

Las vueltas en la máquina de los Ángeles dan lugar a un proceso de deterioro en las probetas, similar al que hacen las cargas del tráfico en los pavimentos.

El ensayo cántabro, además de valorar la cohesión y el poder aglomerante del ligante, puede servir también para evaluar su tenacidad y resistencia a la fatiga. Mientras la probeta permanece en el tambor de Los Ángeles es sometida, por impacto y abrasión contra sus paredes, a un proceso de deterioro, cuya energía se aplica en deformar elástica y plásticamente la mezcla y en producir su rotura. Cuando menor se la capacidad del ligante para deformar elástica y plásticamente, menor será su tenacidad y mayores las pérdidas en el cántabro.

Cambiando las condiciones del ensayo y a las que se someten las probetas antes del mismo, se analiza la variación de la cohesión con la temperatura, la adhesividad árido-ligante y su resistencia al envejecimiento, tres propiedades fundamentales a la hora de evaluar la calidad de un ligante asfáltico.

Una parte de la energía que se genera en cada impacto es absorbida por la deformación elástica del material, otra parte se elimina con las deformaciones plásticas y el resto que no pueden eliminar las probetas es la que causa la fisuración, rotura o disgregación.

Este ensayo nos da una idea clara sobre la capacidad de los aditivos para mejorar la adhesividad y la cohesión en las mezclas dado que, si las uniones son dúctiles y tenaces, las pérdidas por desgaste y abrasión en las probetas son bajas, y cuando resultan frágiles o poco consistentes, las pérdidas se incrementan.

## 4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS ANÁLISIS POR EL MÉTODO UCL®

### 4.2.1. ANÁLISIS POR TEMPERATURA

A continuación se describe el procedimiento para llevar a cabo el análisis por temperatura:

- Las probetas serán introducidas durante 4 horas en un horno eléctrico o en un refrigerador dependiendo de la temperatura de prueba, en la **tabla 4.1.** se muestra el rango de temperaturas que se analizarán y el aparato de ensayo.

**Tabla 4.1.** Temperaturas y aparato de ensayo de las probetas Marshall.

Temperatura de ensayo	Aparato de ensayo
-10	Refrigerador
5	Refrigerador
20	Ambiente
40	Horno
60	Horno

- Después de las 4 horas las probetas han alcanzado la temperatura de ensayo deseada, se sacan de una en una del aparato de ensayo (horno o refrigerador) y la pesamos en la báscula analítica con aproximación al 0.1 gramos, el cual será el peso inicial ( $P_i$ ) de la probeta.
- Se introduce la probeta en la Máquina de los Ángeles lo más rápido posible para evitar que pierda la temperatura de ensayo, se coloca la tapa y los tornillos para asegurarla.
- Se somete la probeta a 300 revoluciones en la Máquina de los Ángeles, para realizar el conteo, se adaptó el contador del compactador Marshall a la Máquina de los Ángeles.
- Una vez terminadas las 300 revoluciones, se desconecta la Máquina de los Ángeles, se desatornilla la tapa y se retira la tapa para sacar la probeta y tomar el peso en la báscula analítica, obteniendo el peso final ( $P_f$ ).

#### 4.2.2. ANÁLISIS POR HUMEDAD

Se utiliza la Máquina de Baño María para llevar a cabo la prueba de humedad, para esto se coloca agua en la misma hasta un nivel suficiente para que las probetas sean sumergidas en agua, posteriormente se ajusta la temperatura a  $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$  y se deja 4 horas para que el agua alcance la temperatura deseada.

Se introducen las probetas en la Máquina de Baño María por 24 horas, posteriormente se extraen las probetas y se dejan secar a temperatura ambiente durante una semana.



**Fig. 4.1.** Máquina de Baño María.

Para llevar a cabo la prueba, se sigue el mismo procedimiento que en el análisis por temperatura.

#### **4.2.3. ANÁLISIS POR ENVEJECIMIENTO**

Para llevar a cabo el análisis por envejecimiento se tendrán que probar las probetas a 160 °C, durante 2, 4, 8, 16 y 32 horas.

Enseguida se describe el procedimiento para llevar a cabo el ensayo de las probetas Marshall por envejecimiento:

- Las probetas deben ser confinadas con una malla antes de ser sometidas al envejecimiento en el horno eléctrico de ventilación forzada.
- Se regula la temperatura del horno a 160 °C  $\pm$  1 que es la temperatura de prueba.
- Se introducen las probetas confinadas en el horno eléctrico.
- Se retiran del horno las probetas que hayan cumplido el tiempo de prueba, esto es, a las 2 horas se extraen del horno las probetas que serán sometidas a este tiempo y todas las que se encuentren dentro del horno serán volteadas a la cara opuesta que se encuentren, dos horas después se extraen del horno las probetas que cumplieron 4 horas y las restantes se voltean, pasadas 8 horas se extraen probetas y las restantes se voltean a las 16 horas se extraen probetas, las restantes se voltean y finalmente se extraen las probetas que han cumplido 32 horas.
- Se dejan enfriar las probetas hasta alcanzar la temperatura ambiente.
- Se les retiran las mallas a las probetas.
- Se lleva a cabo el ensayo en la Máquina de los Ángeles Marshall, para esto se toma el peso de las probetas, el cual será anotado como peso inicial (Pi). Se introducen las probetas en la Máquina de los Ángeles y son sometidas a 300 revoluciones.
- Posteriormente las probetas son extraídas de la Máquina de los Ángeles y pesadas obteniendo así el peso final (Pf).

### 4.3. MATERIALES EMPLEADOS

#### MATERIAL PÉTREO

Se utilizó material pétreo procedente del banco de material AGC, ubicado en la carretera Morelia-Salamanca km 15.



Fig. 4.2. Ubicación del banco de material AGC.

#### MATERIAL ASFÁLTICO

Se utilizó material asfáltico del tipo AC-20 procedente de las refinerías de: Tula, Hidalgo, Salina Cruz, Oaxaca y Salamanca. Guanajuato, los cuales fueron certificados por el laboratorio de la empresa Quimikao, S.A. de C.V. de Guadalajara, Jal.

#### ADITIVOS QUÍMICOS

Se emplearon dos aditivos químicos: Evotherm, y un aditivo fabricado por la empresa Quimikao, S.A. de C.V.

## MUESTREO DE MATERIALES

Debido a que el Método UCL<sup>®</sup>, requiere de una granulometría especial, el material pétreo fue cribado, haciéndolo pasar por la malla No. 4, la malla No. 8 y la malla No. 30, utilizando el material retenido en la malla No. 8 y la malla No. 30.



Fig. 4.3. Cribado de material pétreo.

- Posteriormente se realizó el lavado y secado del material pétreo con la finalidad de dejarlo libre de todo contaminante.

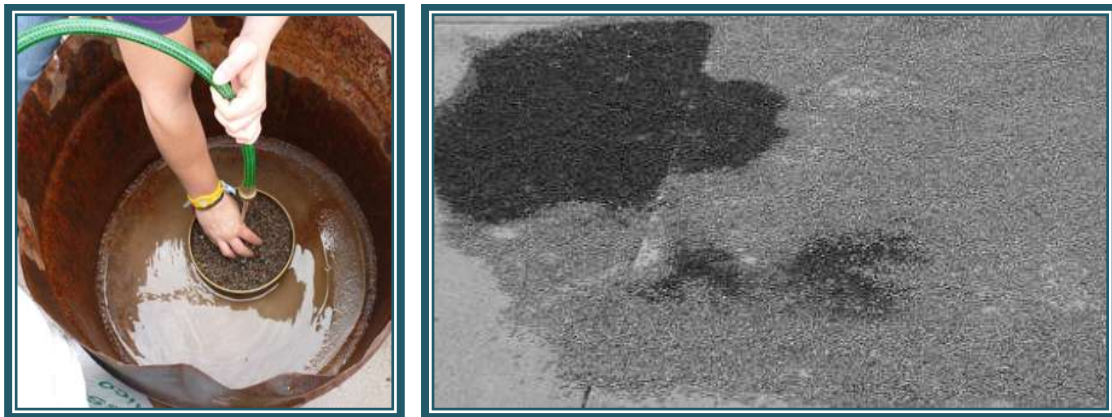


Fig. 4.4. Lavado y tendido para secado de material pétreo.

- Una vez obtenida la granulometría, se procede a pesar el material pétreo utilizando un 80 % (720 gr) de material retenido en la malla No. 8 y un 20 % (180 gr) de material retenido en malla No. 30 y 4.5 % (41 gr) de material asfáltico.





Fig. 4.5. Material pétreo utilizado para fabricar las probetas.

#### 4.4. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Se fabricaron 45 probetas para cada fase de asfalto. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los parámetros de análisis que se llevaron a cabo para la caracterización por el Método UCL<sup>®</sup>.

Tabla 4.2. Parámetros de análisis por el Método UCL<sup>®</sup>.

Método de Análisis	Parámetro de análisis	Número de probetas	Total de probetas
Efecto de temperatura (°C)	-10	3	15
	5	3	
	20	3	
	40	3	
	60	3	
Efecto del agua (°C)	-10	3	15
	5	3	
	20	3	
	40	3	
	60	3	
Efecto de Envejecimiento (Hr)	2	3	15
	4	3	
	8	3	
	16	3	
	32	3	



**Tabla 4.3.** Probetas fabricadas en cada fase por asfalto.

ASFALTO	FASE EXPERIMENTAL	NÚMERO DE PROBETAS
Salamanca	Natural	45
	Evotherm	45
	Aditivo Quimikao	45
Tula	Natural	45
	Evotherm	45
	Aditivo Quimikao	45
Salina Cruz	Natural	45
	Evotherm	45
	Aditivo Quimikao	45

### Enseguida se describe el procedimiento para la fabricación de las probetas Marshall

- Se colocó el material pétreo en charolas en las proporciones antes descritas un 80 % (720 gr) de material retenido en la malla No. 8 y un 20 % (180 gr) de material retenido en malla No. 30. Se introdujeron las charolas que contenían el material pétreo y los moldes en el horno eléctrico de ventilación forzada a una temperatura de 160 °C durante 24 horas, con la finalidad de eliminar el agua del material pétreo y de que los moldes se encuentren a la temperatura requerida para llevar a cabo la fabricación.

**Fig. 4.6.** Horno eléctrico.



**Fig. 4.7.** Charolas y moldes dentro del horno eléctrico.

- Posteriormente transcurridas 20 horas después de haber introducido las charolas y los moldes se introduce el asfalto el cual debe durar 4 horas dentro del horno para que alcance la temperatura necesaria para poder realizar el mezclado de las probetas.



**Fig. 4.8.** Charolas, moldes y asfalto dentro del horno eléctrico.

**La preparación del equipo para llevar a cabo la fabricación se hace de la siguiente manera.**

- Se recortan círculos de papel del diámetro de los moldes, los cuales se requieren 2 por cada probeta.
- Se prepara la balanza para pesar el asfalto.
- Se enciende la parrilla y se coloca la charola en la cual se va a llevar cabo el mezclado de las probetas.
- Se instala el contador en el compactador Marshall y se ajusta en 50 golpes, que son los que se le aplicarán a las probetas por cada lado.



**Fig. 4.9.** Círculos de papel.

Después de haberse cumplido las 24 horas del pre-acondicionamiento del material pétreo y los moldes y las 4 horas del asfalto. Se procede a la fabricación de las probetas agregando el 4.5 % (41 gramos) de asfalto al material pétreo.



**Fig. 4.10.** Aplicación del asfalto en el material pétreo.

- Se realiza el mezclado del material pétreo con el asfalto a fuego lento sobre una estufa, hasta lograr una mezcla homogénea.



**Fig. 4.11.** Mezclado de material pétreo con el asfalto.

- Se saca del horno el molde (base, molde y collarín), se coloca una base de papel sobre el molde.



**Fig. 4.12.** Colocación de la base de papel en el molde.

- Se coloca la mezcla sobre el molde con la ayuda de un cono de papel y de la forma más rápida posible para evitar perder temperatura, una vez que se terminó de agregar toda la mezcla en el molde se agita o se mueve el molde con la finalidad de que se homogenice la mezcla dentro del molde y posteriormente se coloca otra base de papel.





**Fig. 4.13.** Colocación de la mezcla en el molde Marshall.



**Fig. 4.14.** Colocación del molde de papel sobre el molde Marshall.

Se procede con la compactación de la probeta trasladando el molde con cuidado hacia la máquina compactadora Marshall, para posteriormente colocarla en la base de la misma teniendo cuidado de colocarla adecuadamente.



**Fig. 4.15.** Colocación del molde sobre la máquina compactadora Marshall.

- Se procede con la colocación del pisón de la máquina, colocando el contrapeso y el seguro del pisón en la parte superior.



**Fig. 4.16.** Probeta Marshall lista para ser compactada.

- Para iniciar con la compactación de la probeta, se coloca el contador en el número 50, que indica el número de golpes que recibirá la probeta.



**Fig. 4.17.** Contador Marshall.

- Una vez que se compacto la probeta, se retira el molde de la Máquina, teniendo cuidado de que no se salga de su lugar ninguna pieza del molde, posteriormente se retira el collarín y se retira el la mezcla que se encuentre arriba del molde de papel para darle la vuelta al molde y continuar con la compactación siguiendo el mismo procedimiento anterior, de tal forma que la probeta se compacta con 50 golpes por ambos lados.



**Fig. 4.18.** Vuelta de la probeta para la compactación.

- Se retira el contrapeso del Maquina, el seguro y el pisón para poder retirar el molde con la probeta ya compactada.



**Fig. 4.19.** Probeta Marshall compactada por ambos lados.

- Se retira el collarín y la base del molde y se regresan al horno para continuar con la fabricación de probetas.



**Fig. 4.20.** Probeta Marshall dentro del molde.

- Se retiran las bases de papel de la probeta Marshall.



**Fig. 4.21.** Retiro de las bases de papel Probeta Marshall.

- Se deja la probeta dentro del molde hasta que alcance la temperatura ambiente para poder retirarla del molde.



**Fig. 4.22.** Probeta Marshall en proceso de enfriamiento.



- Se realiza el retiro de la probeta y el molde con ayuda de un collarín y un pisón. Se coloca el collarín sobre el molde, se coloca un molde de papel y con ayuda del pisón se le dan golpes suaves hasta que la probeta se retire del molde.



**Fig. 4.23.** Retiro de la probeta Marshall del molde.

- Una vez que se retira la probeta se realiza una marcación sobre ella para lograr identificarla.
- Posteriormente se realiza el lavado del equipo que se utilizó con estopa, thinner y gasolina.



**Fig. 4.24.** Limpieza del equipo utilizado en la fabricación de probetas.

- Se repite este mismo procedimiento en la fabricación de cada una de las probetas de los asfaltos AC-20.



Fig. 4.25. Probetas fabricadas.

#### 4.5. PRUEBA DE DESGASTE

Enseguida se describe la prueba de desgaste de los ángeles de las probetas Marshall.

- Para realizar la prueba de desgaste en la Máquina de los Ángeles, se le instaló el contador de la Máquina Compactadora Marshall y se colocó en 300 revoluciones.



Fig. 4.26. Máquina de los Ángeles.

- Una vez concluidas las 4 horas de acondicionamiento de las probetas se extraen del horno o del refrigerador según la temperatura de prueba lo más pronto posible se pesa obteniendo el peso inicial ( $P_i$ ), después se introduce en la Máquina de los Ángeles, se coloca la tapa atornillándola y se conecta para iniciar la prueba a 300 revoluciones.



**Fig. 4.27.** Peso inicial ( $P_i$ ) de una Probetas Marshall.

- Finalizada la Prueba en la Máquina de los Ángeles, se desconecta la Máquina, se retiran los tornillos y la tapa para extraer la probeta y tomar el peso obteniendo así el peso final ( $P_f$ ).



**Fig. 4.28.** Peso final ( $P_f$ ) de una Probetas Marshall.

## 4.6. ANÁLISIS POR TEMPERATURA

Las probetas Marshall, deben ser pre-acondicionadas durante cuatro horas dentro del horno o refrigerador a cada una de las temperaturas de prueba.



Fig. 4.29. Refrigerador y horno eléctrico.

**Enseguida se describe el procedimiento para llevar a cabo el análisis por temperatura:**

1. Para llevar a cabo la prueba a las temperaturas de 40 y 60 °C, se calibra el horno eléctrico a cada una de las temperaturas y se introducen las probetas durante 4 horas. Para llevar a cabo la prueba las temperaturas de -10 y 5 °C, se calibra el refrigerador a cada una de las temperaturas y para llevar a cabo la prueba de la temperatura a los 20 °C, las probetas se probarán a temperatura ambiente.



Fig. 4.30. Probetas Marshall dentro del refrigerador y horno eléctrico.

#### 4.6.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR TEMPERATURA EN ASFALTOS AC-20

Enseguida se muestran los resultados de las pruebas por temperatura que se realizaron en los asfaltos en cada una de sus fases.

##### 1. Asfalto AC-20 de Salamanca

**Tabla 4.4.** Resultados de la prueba por temperatura en asfalto AC-20 de Salamanca.

ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	925	325	64.86	63.79
	2	923	286	69.01	
	3	922	392	57.48	
5	4	923	372	59.70	57.79
	5	919	399	56.58	
	6	909	390	57.10	
20	7	914	550	39.82	36.11
	8	921	557	39.52	
	9	925	657	28.97	
40	10	915	824	9.95	10.44
	11	918	823	10.35	
	12	917	816	11.01	
60	13	909	811	10.78	17.35
	14	922	722	21.69	
	15	919	739	19.59	
75	16	932	147	84.23	84.24
	17	934	152	83.73	
	18	933	142	84.78	

En la gráfica se muestran los resultados obtenidos en la prueba por temperatura del asfalto AC-20 de Salamanca:

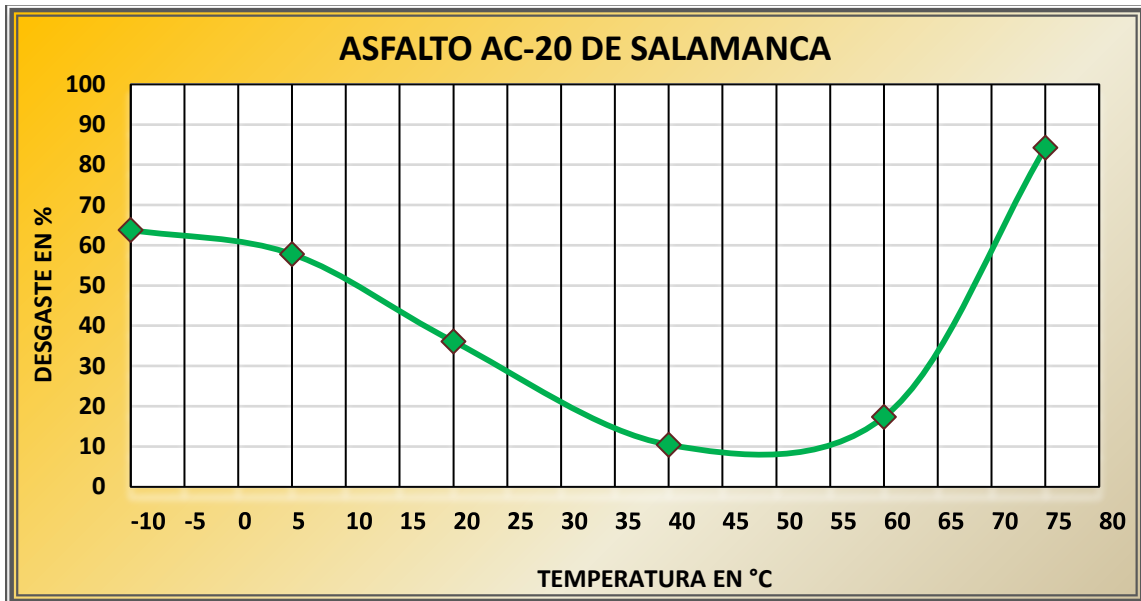


Fig. 4.31. Efecto de la temperatura en asfalto AC-20 de Salamanca.

## 2. Asfalto AC-20 de Tula

Tabla 4.5. Resultados de la prueba por temperatura en asfalto AC-20 de Tula.

ASFALTO AC-20 DE TULA					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	909	426	53.14	56.13
	2	920	370	59.78	
	3	932	415	55.47	
5	4	928	664	28.45	38.24
	5	920	512	44.35	
	6	916	532	41.92	
20	7	925	776	16.11	18.01
	8	935	775	17.11	
	9	927	734	20.82	
40	10	919	809	11.97	15.29
	11	919	750	18.39	
	12	928	784	15.52	
60	13	926	287	69.01	64.45
	14	908	303	66.63	
	15	915	387	57.70	

En la gráfica se muestran los resultados obtenidos en la prueba por temperatura del asfalto AC-20 de Tula.

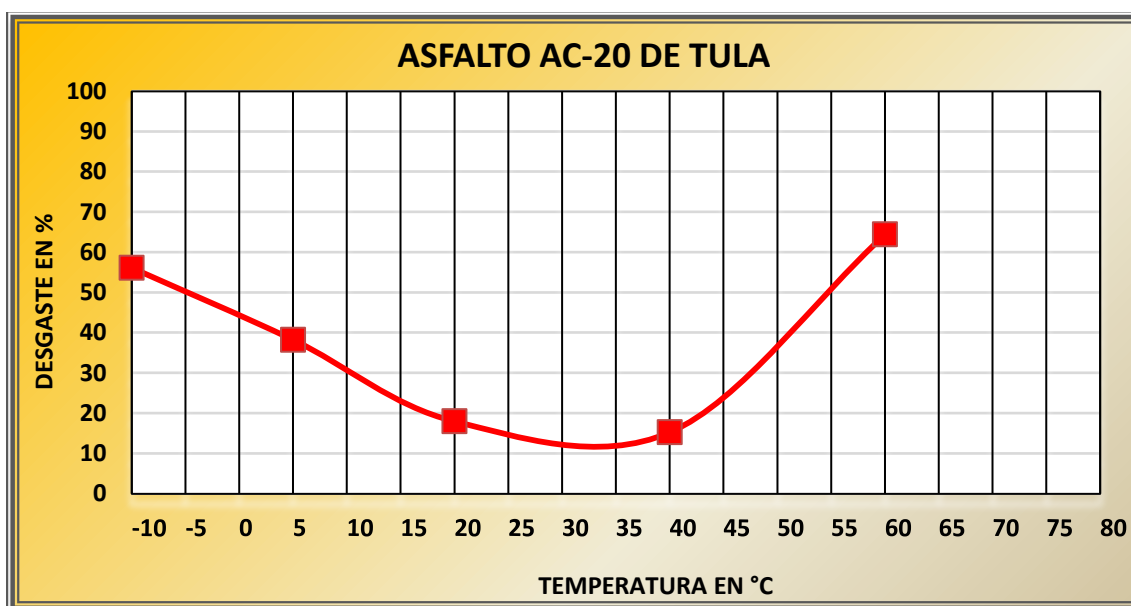


Fig. 4.32. Efecto de la temperatura en asfalto AC-20 de Tula.

### 3. Asfalto AC-20 de Salina Cruz

Tabla 4.6. Resultados de la prueba por temperatura en asfalto AC-20 de Salina Cruz.

ASFALTO AC-20 DE SALINA CRUZ					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	930	447	51.94	55.36
	2	930	423	54.52	
	3	924	373	59.63	
5	4	928	627	32.44	39.05
	5	930	560	39.78	
	6	928	511	44.94	
20	7	929	800	13.89	13.70
	8	925	791	14.49	
	9	928	810	12.72	
40	10	916	737	19.54	20.15
	11	921	776	15.74	
	12	914	684	25.16	
60	13	919	269	70.73	73.75
	14	921	132	85.67	
	15	922	324	64.86	

En la gráfica se muestran los resultados obtenidos en la prueba por temperatura del asfalto AC-20 de Salina Cruz.

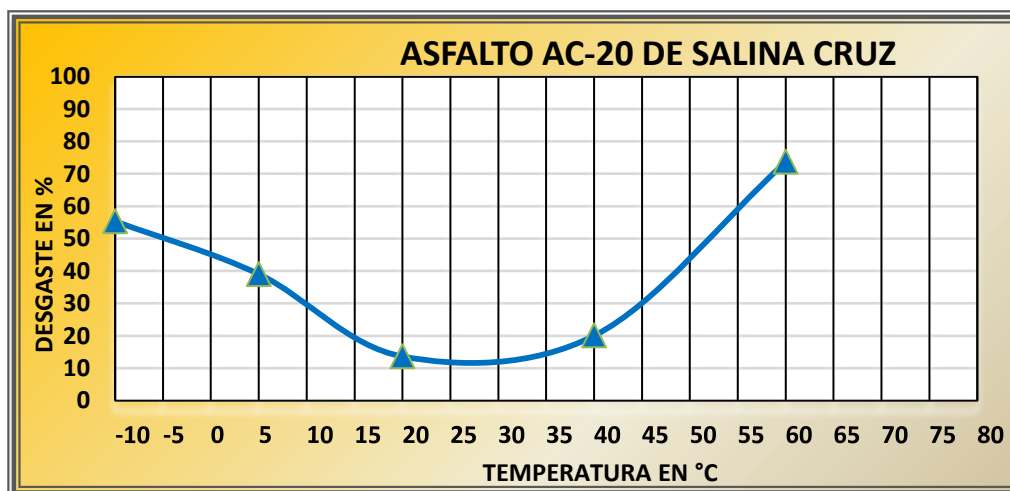


Fig. 4.33. Efecto de la temperatura en asfalto AC-20 de Salina Cruz.



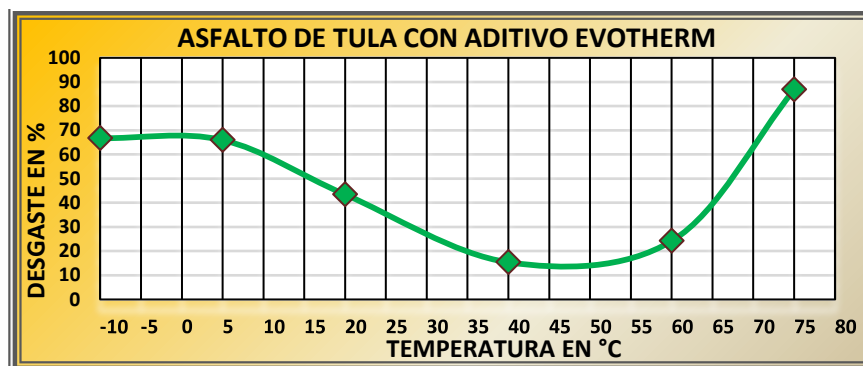
#### 4.6.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR TEMPERATURA EN ASFALTOS CON ADITIVO EVOTHERM

##### 1. Asfalto de Salamanca con aditivo Evotherm

**Tabla 4.7.** Resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.

ASFALTO DE SALAMANCA CON ADITIVO EVOTHERM					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	931	344	63.05	66.81
	2	937	249	73.43	
	3	938	338	63.97	
5	4	939	332	64.64	66.04
	5	940	283	69.89	
	6	936	341	63.57	
20	7	935	532	43.10	43.53
	8	942	498	47.13	
	9	937	559	40.34	
40	10	934	784	16.06	15.47
	11	937	801	14.51	
	12	935	787	15.83	
60	13	930	706	24.09	24.30
	14	929	743	20.02	
	15	941	670	28.80	
75	16	925	120	87.03	86.95
	17	932	124	86.70	
	18	917	118	87.13	

En la gráfica 4.34 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por temperatura del asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.



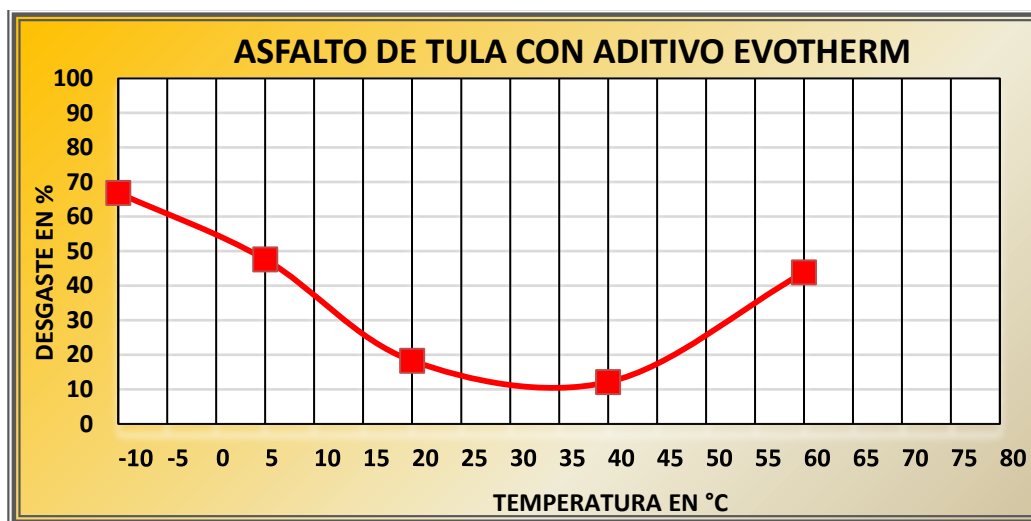
**Fig. 4.34.** Efecto de la temperatura en asfalto de Salamanca con aditivo Evotherm.

## 2. Asfalto de Tula con aditivo Evotherm

**Tabla 4.8.** Resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.

ASFALTO DE TULA CON ADITIVO EVOTHERM					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	931	344	63.05	66.81
	2	937	249	73.43	
	3	938	338	63.97	
5	4	941	498	47.08	47.57
	5	941	505	46.33	
	6	941	477	49.31	
20	7	928	771	16.92	18.23
	8	938	770	17.91	
	9	931	746	19.87	
40	10	935	847	9.41	12.07
	11	933	816	12.54	
	12	932	799	14.27	
60	13	932	517	44.53	43.81
	14	936	606	35.26	
	15	937	453	51.65	

En la gráfica 4.35 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por temperatura del asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.



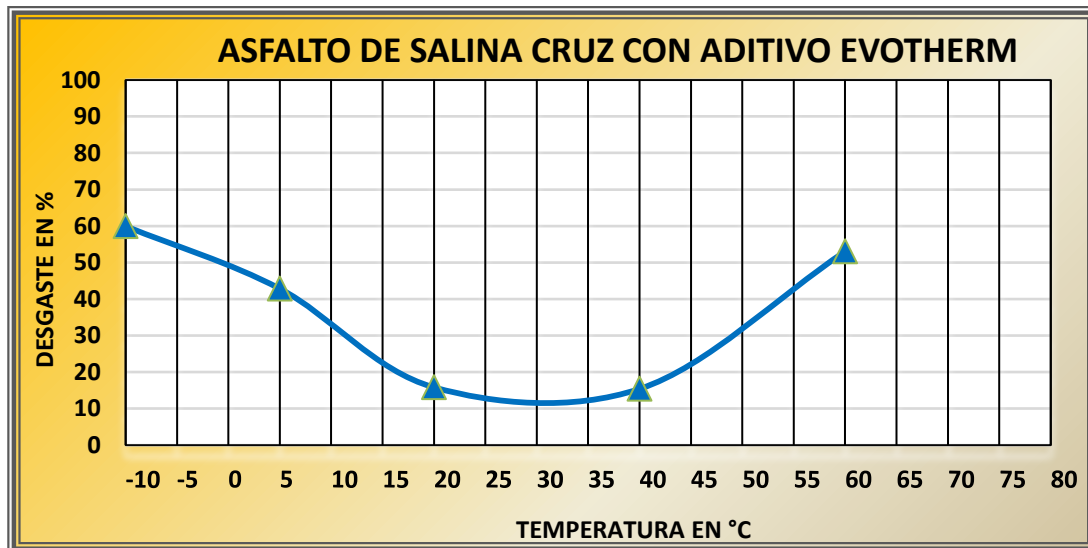
**Fig. 4.35.** Efecto de la temperatura en asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.

### 3. Asfalto de Salina Cruz con aditivo Evotherm

**Tabla 4.9.** Resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.

ASFALTO DE SALINA CRUZ CON ADITIVO EVOTHERM					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	933	439	52.95	59.99
	2	938	387	58.74	
	3	936	297	68.27	
5	4	936	506	45.94	42.89
	5	936	489	47.76	
	6	938	610	34.97	
20	7	939	780	16.93	15.89
	8	934	798	14.56	
	9	934	783	16.17	
40	10	935	785	16.04	15.47
	11	931	789	15.25	
	12	932	791	15.13	
60	13	926	429	53.67	53.09
	14	928	428	53.88	
	15	932	450	51.72	

En la gráfica 4.36 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por temperatura del asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.



**Fig. 4.36.** Efecto de la temperatura en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.

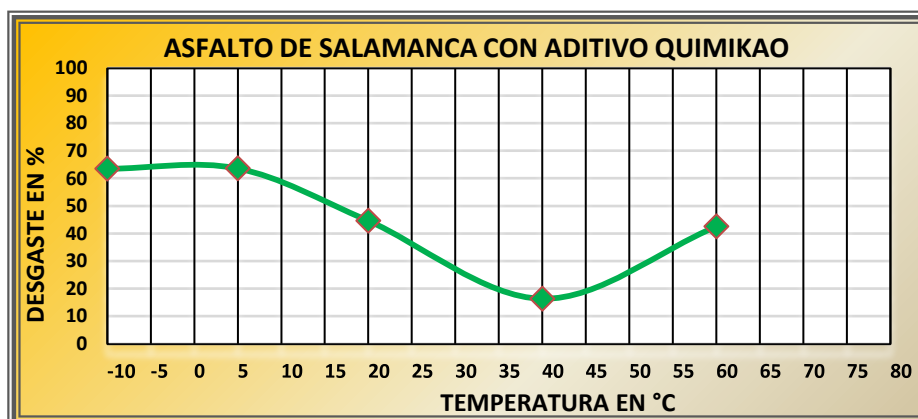
### 4.6.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR TEMPERATURA EN ASFALTOS CON ADITIVO QUIMIKAO

#### 1. Asfalto de Salamanca con aditivo de Quimikao

**Tabla 4.10.** Resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.

ASFALTO DE SALAMANCA CON ADITIVO DE QUIMIKAO					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	934	391	58.14	63.54
	2	941	305	67.59	
	3	934	328	64.88	
5	4	936	379	59.51	63.64
	5	931	343	63.16	
	6	932	296	68.24	
20	7	934	490	47.54	44.66
	8	937	521	44.40	
	9	935	542	42.03	
40	10	932	765	17.92	16.37
	11	925	802	13.30	
	12	934	767	17.88	
60	13	924	564	38.96	42.59
	14	933	505	45.87	
	15	929	530	42.95	

En la gráfica 4.37 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por temperatura del asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.



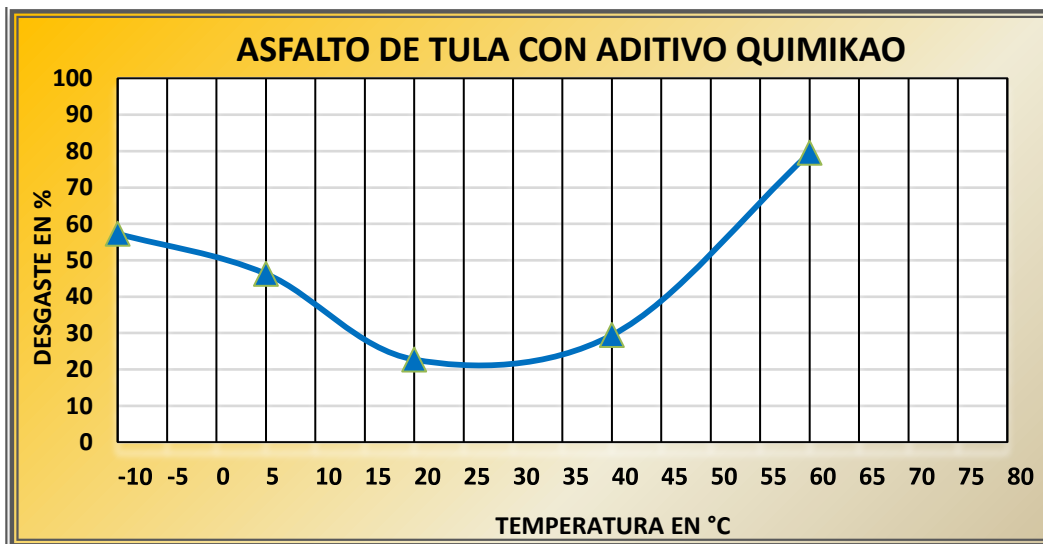
**Fig. 4.37.** Efecto de la temperatura en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.

## 2. Asfalto de Tula con aditivo de Quimikao

**Tabla 4.11.** Resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.

ASFALTO DE TULA QUIMIKAO					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	940	394	58.09	57.30
	2	934	410	56.10	
	3	941	398	57.70	
5	4	941	505	46.33	46.28
	5	941	502	46.65	
	6	940	509	45.85	
20	7	938	734	21.75	22.72
	8	937	719	23.27	
	9	938	721	23.13	
40	10	930	653	29.78	29.47
	11	935	666	28.77	
	12	938	658	29.85	
60	13	939	265	71.78	79.56
	14	939	120	87.22	
	15	935	190	79.68	

En la gráfica 4.38 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por temperatura del asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.



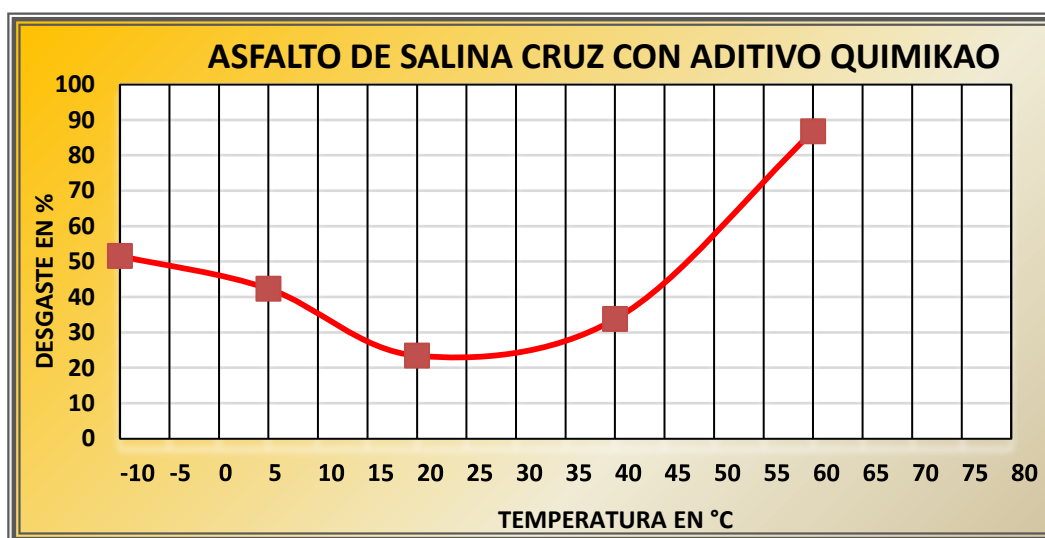
**Fig. 4.38.** Efecto de la temperatura en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.

### 3. Asfalto de Salina Cruz con aditivo de Quimikao

**Tabla 4.12.** Resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.

ASFALTO DE SALINA CRUZ CON QUIMIKAO					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	933	465	50.16	51.58
	2	941	447	52.50	
	3	935	448	52.09	
5	4	926	542	41.47	42.33
	5	941	536	43.04	
	6	939	540	42.49	
20	7	929	711	23.47	23.45
	8	941	717	23.80	
	9	923	710	23.08	
40	10	941	626	33.48	33.79
	11	929	613	34.02	
	12	936	619	33.87	
60	13	933	113	87.89	86.77
	14	940	123	86.91	
	15	932	135	85.52	

En la gráfica 4.39 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por temperatura del asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.



**Fig. 4.39.** Efecto de la temperatura en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.

#### 4.7. ANÁLISIS POR HUMEDAD

Para llevar a cabo el ensayo por susceptibilidad a la humedad se introducen las probetas Marshall dentro de la Máquina de baño María, enseguida se describe el procedimiento:

- Se introduce agua en la Máquina de baño María a un nivel necesario para que las probetas sean cubiertas por el agua. Se conecta a la electricidad y se calibra a una temperatura de  $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ , y se deja por 6 horas para que el agua alcance la temperatura.

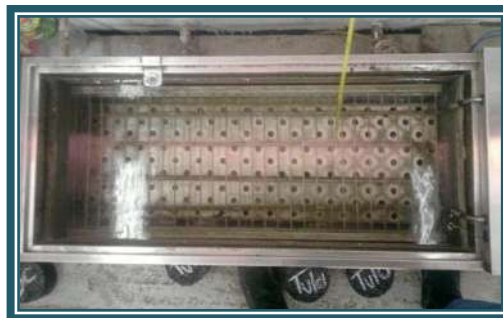


Fig. 4.40. Máquina de baño María con agua.

- Una vez que se encuentra el agua a la temperatura deseada, se introducen las probetas Marshall y de tapa la Máquina baño María con un unisel para evitar que pierda temperatura y se dejan por 24 horas.



Fig. 4.41. Probetas Marshall dentro de la Máquina de baño María.

- Una vez que se han cumplido las 24 horas se extraen las probetas escurriéndolas para colocarlas en un sitio para dejarlas que se sequen totalmente para llevar a cabo el ensayo de desgaste de los ángulos.



**Fig. 4.42.** Retiro de las probetas Marshall de la Máquina de baño María.

- Después que las probetas se han secado completamente, se realiza el mismo procedimiento que se llevó a cabo en el acondicionamiento para el análisis por humedad, es decir las probetas serán sometidas a las temperaturas: -10, 5, 20, 40 y 60 °C, antes de ser sometidas a la prueba de desgaste.



#### 4.7.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR HUMEDAD EN ASFALTOS AC-20

##### 1. Asfalto AC-20 de Salamanca

Tabla 4.13. Resultados de la prueba por humedad en asfalto AC-20 de Salamanca.

ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	932	126	86.48	91.19
	2	931	49	94.74	
	3	927	71	92.34	
5	4	925	92	90.05	95.03
	5	923	250	72.91	
	6	912	0	100.00	
20	7	936	414	55.77	58.13
	8	909	387	57.43	
	9	928	360	61.21	
40	10	928	634	31.68	30.79
	11	917	390	57.47	
	12	913	640	29.90	
60	13	925	473	48.86	50.18
	14	734	356	51.50	
	15	772	651	15.67	

En la gráfica 4.43 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por humedad del asfalto AC-20 de Salamanca.

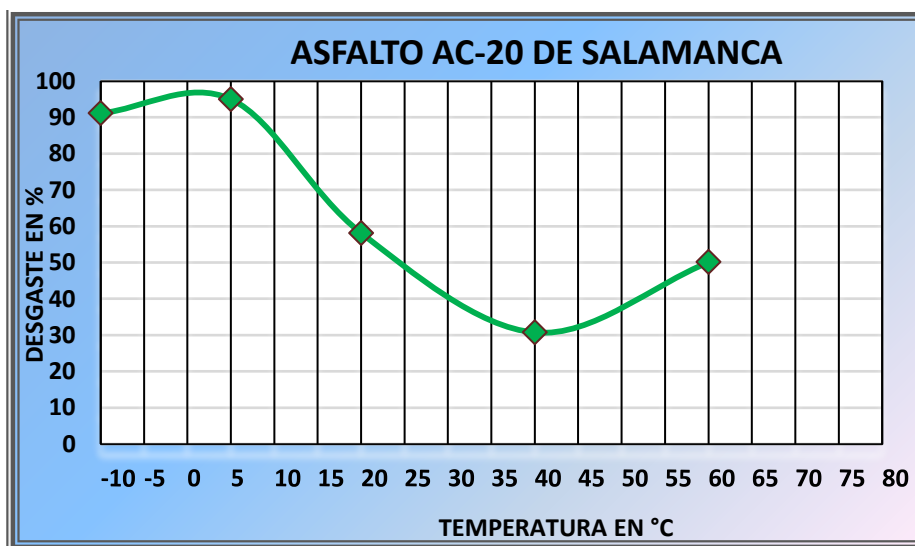


Fig. 4.43. Efecto de la humedad en asfalto AC-20 de Salamanca.

## 2. Asfalto AC-20 de Tula

Tabla 4.14. Resultados de la prueba por humedad en asfalto AC-20 de Tula.

ASFALTO AC-20 DE TULA					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	904	127	85.95	89.61
	2	937	0	100.00	
	3	917	157	82.88	
5	4	934	295	68.42	70.93
	5	928	312	66.38	
	6	932	205	78.00	
20	7	934	478	48.82	46.77
	8	911	518	43.14	
	9	933	482	48.34	
40	10	918	505	44.99	46.09
	11	925	776	16.11	
	12	928	490	47.20	
60	13	914	261	71.44	81.56
	14	923	120	87.00	
	15	931	128	86.25	

En la gráfica 4.44 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por humedad del asfalto AC-20 de Tula.

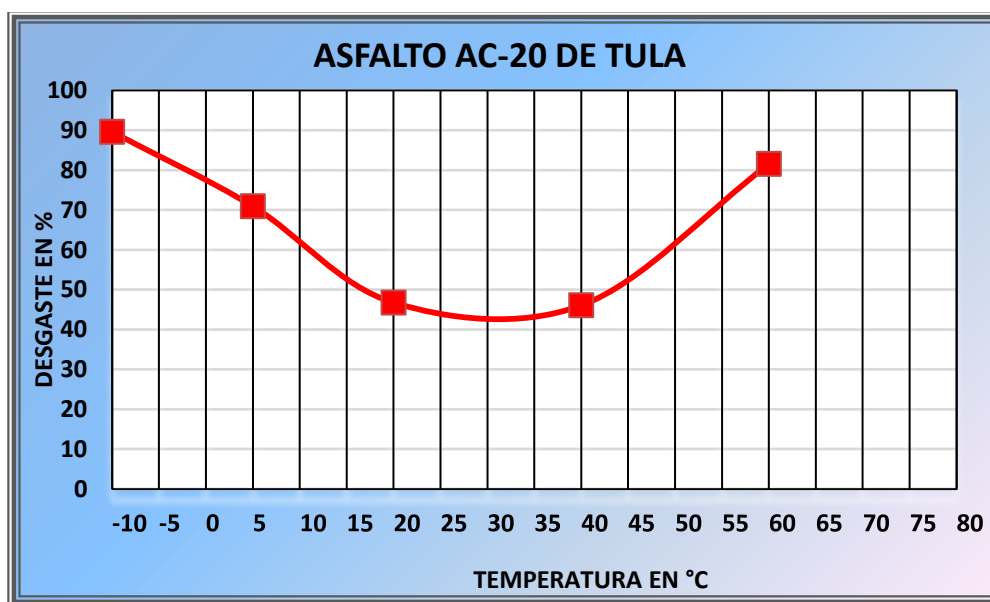


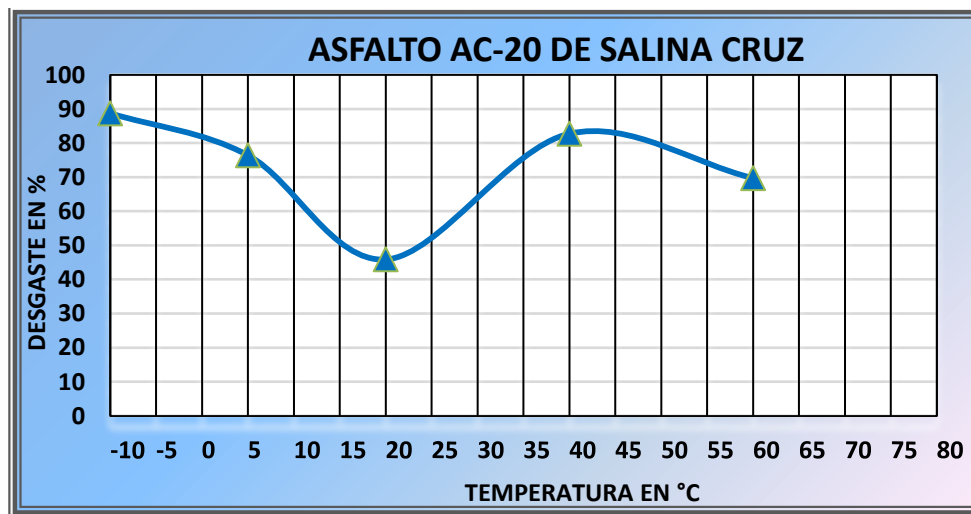
Fig. 4.44. Efecto de la humedad en asfalto AC-20 de Tula.

### 3. Asfalto AC-20 de Salina Cruz

**Tabla 4.15.** Resultados de la prueba por humedad en asfalto AC-20 de Salina Cruz.

ASFALTO AC-20 DE SALINA CRUZ					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	721	69	90.43	88.72
	2	932	149	84.01	
	3	929	77	91.71	
5	4	893	203	77.27	76.41
	5	645	155	75.97	
	6	596	143	76.01	
20	7	917	494	46.13	45.92
	8	910	120	86.81	
	9	630	342	45.71	
40	10	926	168	81.86	82.75
	11	917	150	83.64	
	12	719	423	41.17	
60	13	722	222	69.25	69.72
	14	897	130	85.51	
	15	436	130	70.18	

En la gráfica 4.45 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por humedad del asfalto AC-20 de Salina Cruz.



**Fig. 4.45.** Efecto de la humedad en asfalto AC-20 de Salina Cruz.

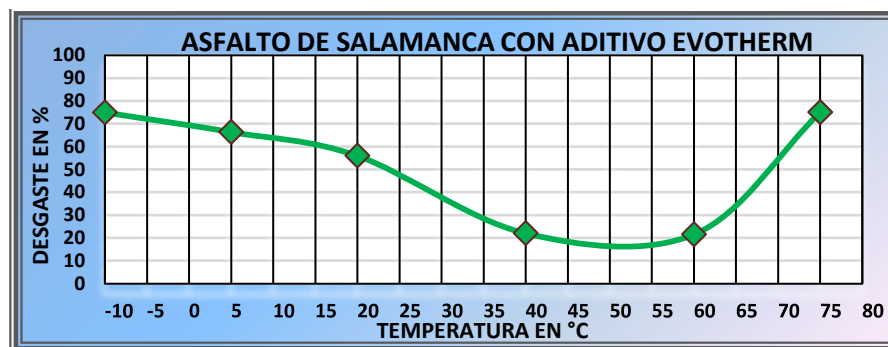
#### 4.7.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR HUMEDAD EN ASFALTOS CON ADITIVO EVOTHERM

##### 1. Asfalto de Salamanca con aditivo Evotherm

**Tabla 4.16.** Resultados de la prueba por humedad en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.

ASFALTO DE SALAMANCA CON EVOTHERM					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	941	95	89.90	74.99
	2	941	265	71.84	
	3	938	345	63.22	
5	4	938	248	73.56	66.42
	5	938	374	60.13	
	6	941	324	65.57	
20	7	939	422	55.06	56.04
	8	937	411	56.14	
	9	938	404	56.93	
40	10	939	685	27.05	22.09
	11	937	696	25.72	
	12	918	794	13.51	
60	13	941	769	18.28	21.59
	14	937	734	21.66	
	15	926	696	24.84	
75	16	939	245	73.91	75.11
	17	937	230	75.45	
	18	941	226	75.98	

En la gráfica 4.46 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por humedad del asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.



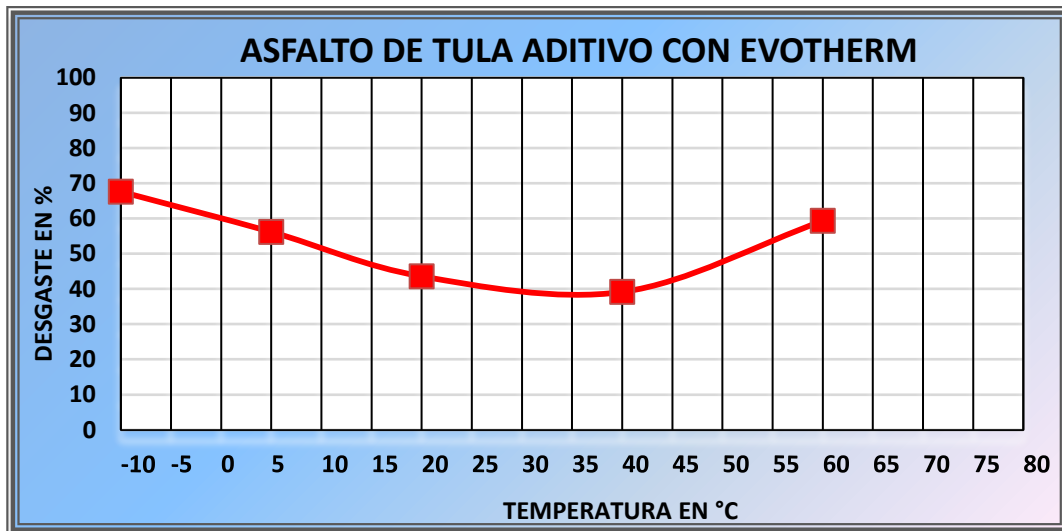
**Fig. 4.46.** Efecto de la humedad en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.

## 2. Asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm

**Tabla 4.17.** Resultados de la prueba por humedad en asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.

ASFALTO DE TULA CON EVOTHERM					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	939	346	63.15	67.61
	2	930	282	69.68	
	3	937	281	70.01	
5	4	935	431	53.90	56.19
	5	941	423	55.05	
	6	941	380	59.62	
20	7	936	661	29.38	43.57
	8	919	198	78.45	
	9	935	721	22.89	
40	10	933	281	69.88	39.17
	11	934	765	18.09	
	12	931	656	29.54	
60	13	936	415	55.66	59.34
	14	928	240	74.14	
	15	931	482	48.23	

En la gráfica 4.47 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por humedad del asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.



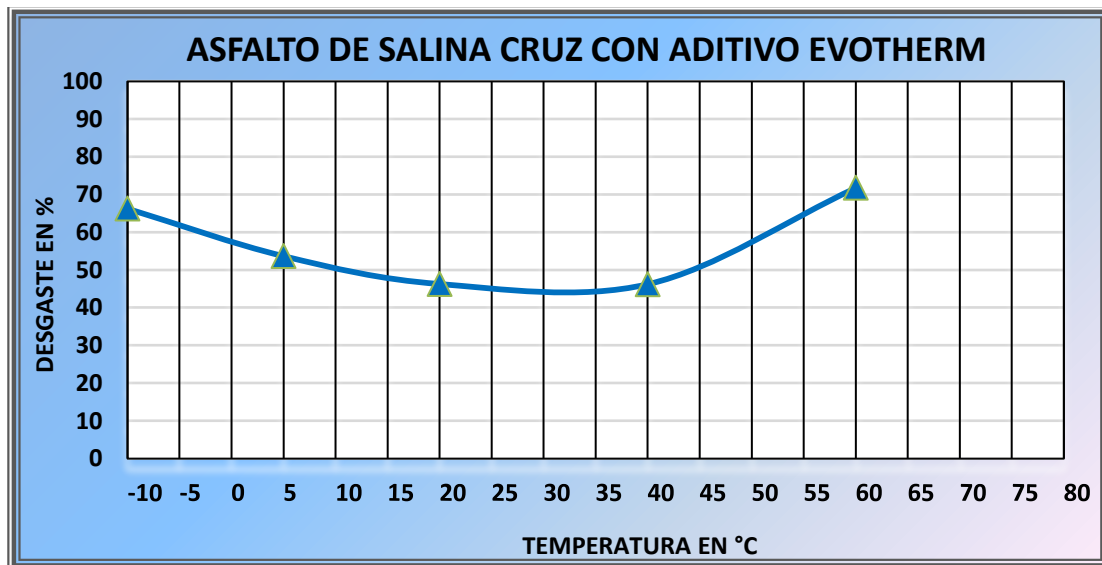
**Fig. 4.47.** Efecto de la humedad en asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.

### 3. Asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm

**Tabla 4.18.** Resultados de la prueba por humedad en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.

ASFALTO DE SALINA CRUZ CON EVOTHERM					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	941	382	59.40	66.27
	2	941	334	64.51	
	3	940	236	74.89	
5	4	941	401	57.39	53.67
	5	941	477	49.31	
	6	939	429	54.31	
20	7	941	142	84.91	46.26
	8	941	639	32.09	
	9	941	736	21.79	
40	10	941	717	23.80	46.20
	11	935	665	28.88	
	12	938	132	85.93	
60	13	934	147	84.26	71.79
	14	941	422	55.15	
	15	940	226	75.96	

En la gráfica 4.48 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por humedad del asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.



**Fig. 4.48.** Efecto de la humedad en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.

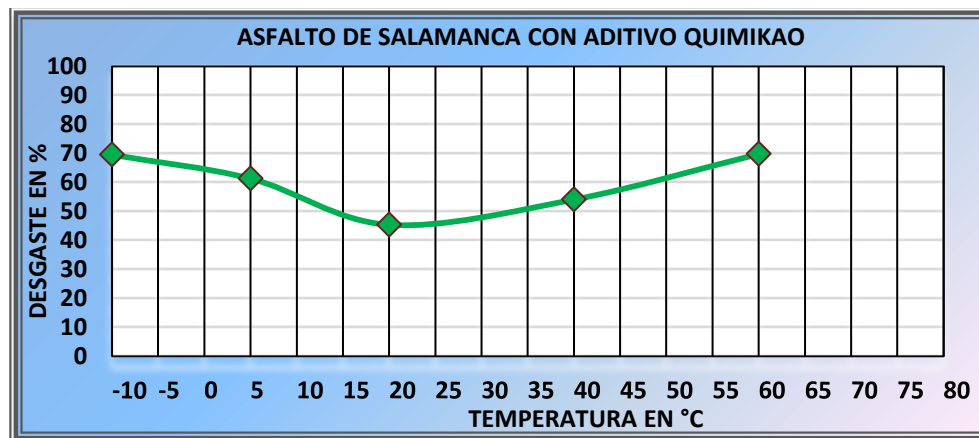
### 4.7.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR HUMEDAD EN ASFALTOS CON ADITIVO QUIMIKAO

#### 1. Asfalto de Salamanca con aditivo de Quimikao

**Tabla 4.19.** Resultados de la prueba por humedad en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.

ASFALTO DE SALAMANCA QUIMIKAO					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	941	252	73.22	69.52
	2	940	294	68.72	
	3	941	314	66.63	
5	4	935	390	58.29	61.28
	5	937	350	62.65	
	6	938	348	62.90	
20	7	940	494	47.45	45.33
	8	936	506	45.94	
	9	939	539	42.60	
40	10	938	424	54.80	54.05
	11	935	431	53.90	
	12	941	438	53.45	
60	13	938	262	72.07	69.78
	14	936	282	69.87	
	15	939	306	67.41	

En la gráfica 4.49 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por humedad del asfalto de Salamanca, modificado con un aditivo Quimikao.



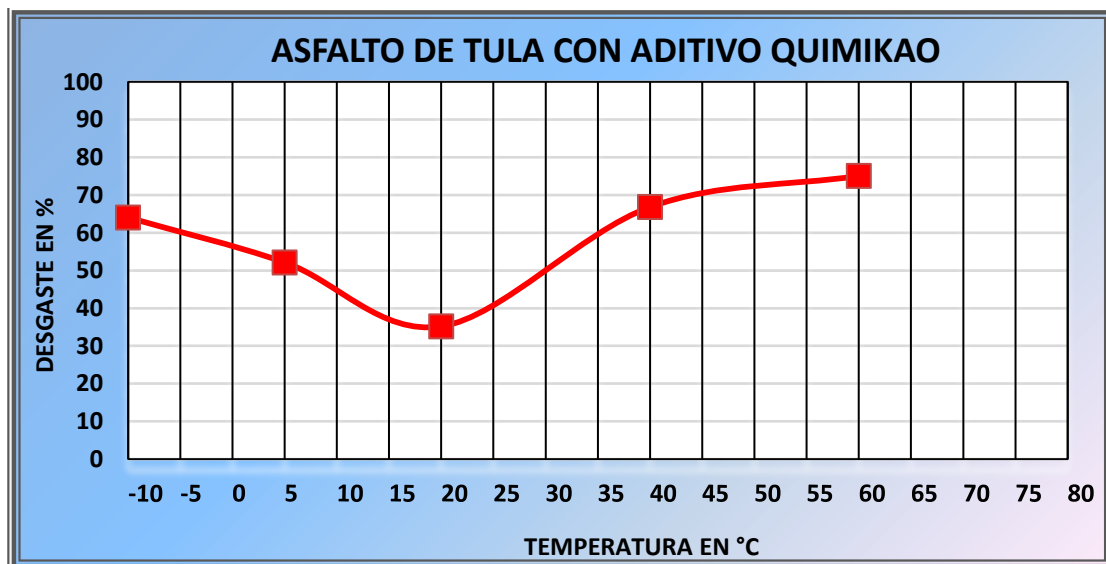
**Fig. 4.49.** Efecto de la humedad en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.

## 2. Asfalto de Tula con aditivo de Quimikao

**Tabla 4.20.** Resultados de la prueba por humedad en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.

ASFALTO QUIMIKAO DE TULA					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	941	350	62.81	64.03
	2	941	354	62.38	
	3	940	311	66.91	
5	4	940	409	56.49	52.13
	5	939	493	47.50	
	6	941	448	52.39	
20	7	941	619	34.22	35.19
	8	941	607	35.49	
	9	940	603	35.85	
40	10	940	316	66.38	66.83
	11	941	310	67.06	
	12	938	309	67.06	
60	13	939	208	77.85	75.08
	14	937	265	71.72	
	15	941	229	75.66	

En la gráfica 4.50 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por humedad del asfalto de Tula, modificado con un aditivo Quimikao.



**Fig. 4.50.** Efecto de la humedad en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.

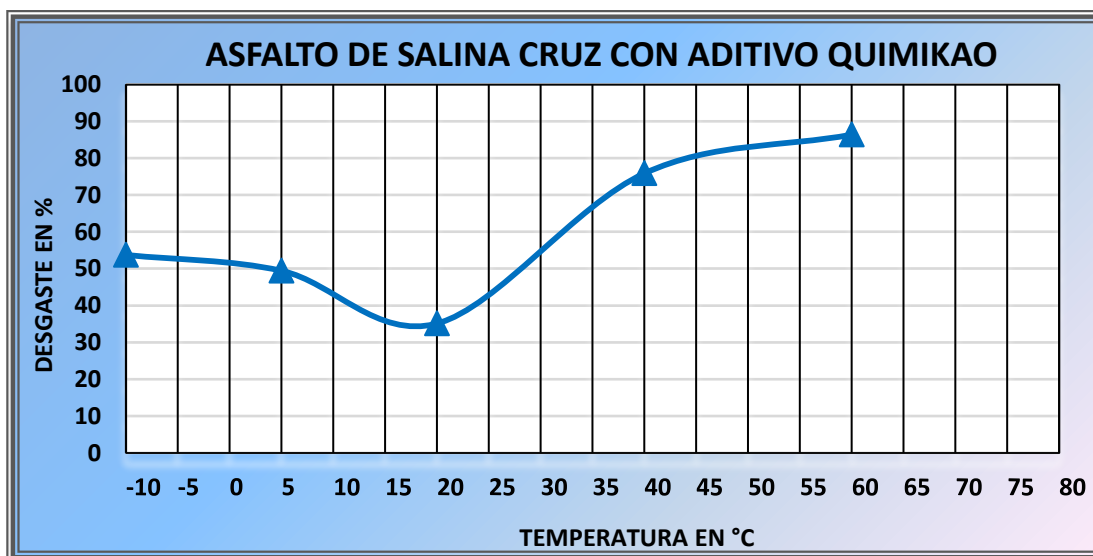


### 3. Asfalto de Salina Cruz con aditivo de Quimikao

**Tabla 4.21.** Resultados de la prueba por humedad en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.

ASFALTO QUIMIKAO DE SALINA CRUZ					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
-10	1	941	429	54.41	53.79
	2	940	417	55.64	
	3	941	458	51.33	
5	4	941	450	52.18	49.49
	5	940	511	45.64	
	6	940	464	50.64	
20	7	941	619	34.22	35.19
	8	940	607	35.43	
	9	941	603	35.92	
40	10	939	235	74.97	75.97
	11	937	232	75.24	
	12	941	210	77.68	
60	13	941	121	87.14	86.47
	14	941	123	86.93	
	15	941	138	85.33	

En la gráfica 4.51 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por humedad del asfalto de Salina Cruz, modificado con un aditivo Quimikao.

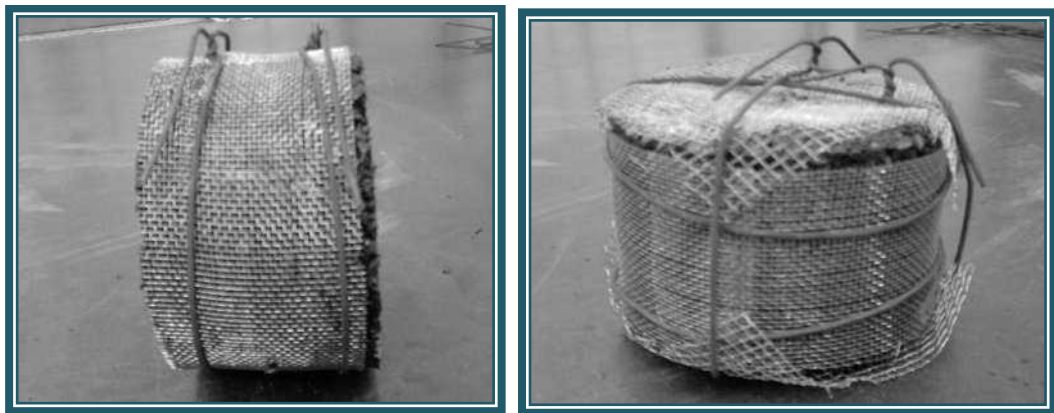


**Fig. 4.51.** Efecto de la humedad en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.

#### 4.8. ANÁLISIS POR ENVEJECIMIENTO

Es necesario confinar las probetas con malla de acero que fueron recortadas a la medida de las probetas para llevar a cabo el análisis por envejecimiento enseguida se describe el procedimiento:

- Para confinar una probeta Marshall se requieren 3 mallas: 2 de ellas se colocaran en las caras superior e inferior y la otra alrededor de las probetas, se colocan las mayas de acero en las probetas, amarrándolas con alambre recocido como se muestra en las figuras.



**Fig. 4.52.** Probetas Marshall confinadas.

- Una vez confinadas las probetas, se someterán a 165 °C en el horno eléctrico de ventilación forzada durante 2, 4, 8, 16 y 32 horas. Tomando en cuenta que se deben voltear las probetas cada 2 horas, es decir se introducen las probetas y transcurridas las 2 horas se extraen del horno las probetas que ya han cumplido con el tiempo de ensayo y las restantes deben ser volteadas y cerrar el horno.



**Fig. 4.53.** Probetas Marshall confinadas dentro del horno.

- Pasadas 4 horas, deberán extraerse del horno las probetas que han cumplido su tiempo de ensayo y voltear las que se quedarán en el horno.
- Después de las 6 horas deberán voltearse todas las probetas que se encuentren en el horno sin extraer ninguna.
- Transcurridas las 8 horas se extraen del horno las probetas que cumplieron con este tiempo de ensayo y se voltean las que se quedarán en el horno.
- Se voltearán las probetas que se encuentren en el horno cada 2 horas hasta que hayan cumplido las 16 horas se extraerán las probetas que se deberán ensayar a esta temperatura.
- Finalmente se voltearán las probetas restantes cada 2 horas hasta cumplir con las 32 horas.
- Una vez que se sometieron las probetas a las diferentes temperaturas se dejaron enfriar hasta que alcancen la temperatura ambiente, para posteriormente retirar las mallas de acero e iniciar el ensayo de desgaste de los ángeles.

### 4.8.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR ENVEJECIMIENTO EN ASFALTOS AC-20

#### 1. Asfalto AC-20 de Salamanca

Tabla 4.22. Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto AC-20 de Salamanca.

ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
2	1	910	524	42.42	44.01
	2	916	516	43.67	
	3	912	493	45.94	
4	4	911	309	66.08	65.71
	5	921	333	63.84	
	6	918	301	67.21	
8	7	923	134	85.48	83.07
	8	933	195	79.10	
	9	924	142	84.63	
16	10	922	98	89.37	83.87
	11	918	146	84.10	
	12	919	201	78.13	
32	13	920	0	100.00	100.00
	14	914	0	100.00	
	15	918	0	100.00	

En la gráfica 4.54 se muestran los resultados obtenidos de la prueba por envejecimiento del asfalto AC-20 de Salamanca.

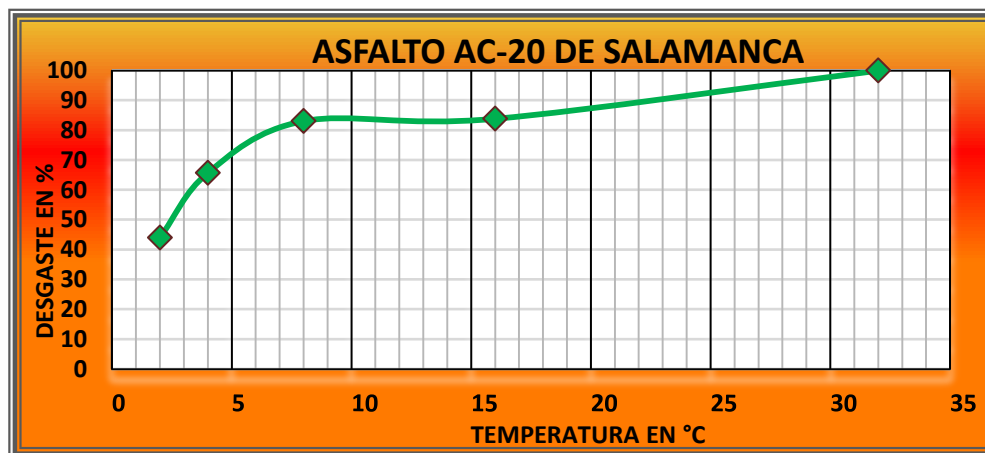


Fig. 4.54. Efecto del envejecimiento en asfalto AC-20 de Salamanca.

## 2. Asfalto AC-20 de Tula

Tabla 4.23. Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto AC-20 de Tula.

ASFALTO AC-20 DE TULA					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
2	1	924	719	22.19	26.81
	2	917	620	32.39	
	3	921	683	25.84	
4	4	912	492	46.05	42.21
	5	921	546	40.72	
	6	918	552	39.87	
8	7	926	230	75.16	77.99
	8	923	225	75.62	
	9	922	155	83.19	
16	10	921	269	70.79	78.61
	11	925	198	78.59	
	12	923	125	86.46	
32	13	920	0	100.00	100.00
	14	916	0	100.00	
	15	923	0	100.00	

En la gráfica 4.55 se muestran los resultados obtenidos de la prueba por envejecimiento del asfalto AC-20 de Tula.

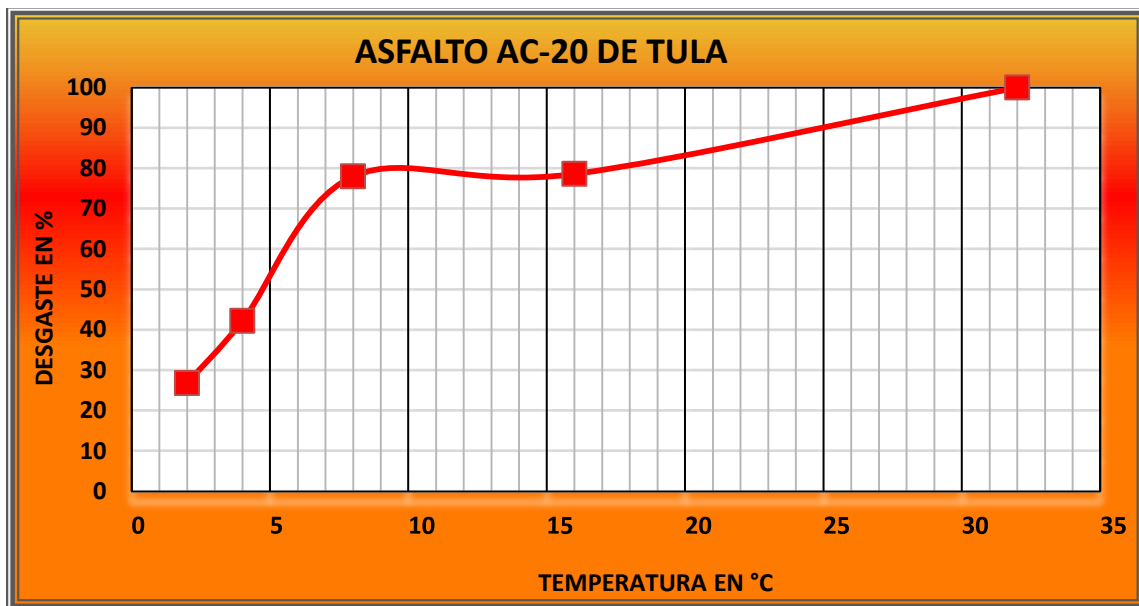


Fig. 4.55. Efecto del envejecimiento en asfalto AC-20 de Tula.

### 3. Asfalto AC-20 de Salina Cruz

Tabla 4.24. Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto AC-20 de Salina Cruz.

ASFALTO AC-20 DE SALINA CRUZ					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
2	1	918	779	15.14	17.00
	2	918	734	20.04	
	3	917	772	15.81	
4	4	911	222	75.63	74.26
	5	936	251	73.18	
	6	922	240	73.97	
8	7	915	198	78.36	78.21
	8	912	184	79.82	
	9	917	216	76.44	
16	10	915	196	78.58	79.11
	11	920	114	87.61	
	12	918	265	71.13	
32	13	905	0	100.00	100.00
	14	909	0	100.00	
	15	912	0	100.00	

En la gráfica 4.56 se muestran los resultados obtenidos de la prueba por envejecimiento del asfalto AC-20 de Salina Cruz.

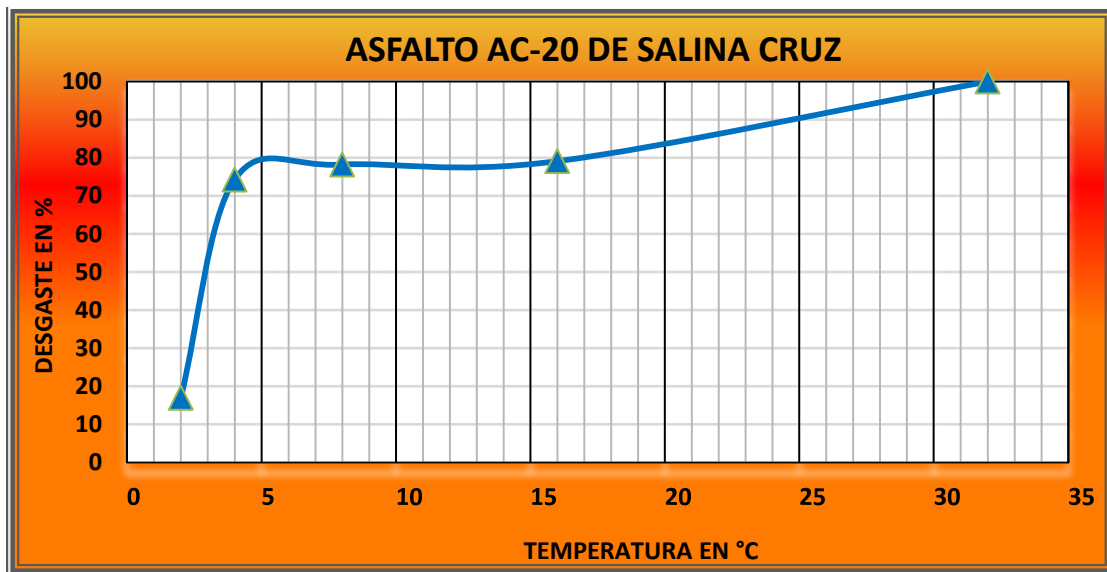


Fig. 4.56. Efecto del envejecimiento en asfalto AC-20 de Salina Cruz.

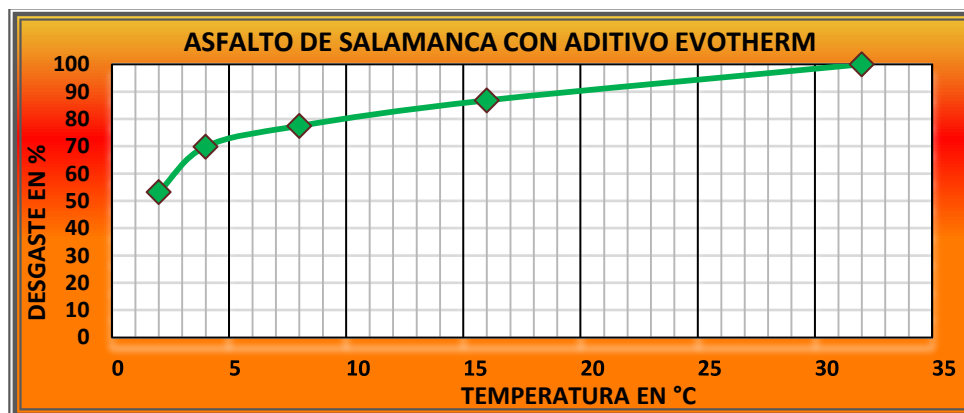
#### 4.8.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR ENVEJECIMIENTO EN ASFALTOS CON ADITIVO EVOTHERM

##### 1. Asfalto de Salamanca con aditivo Evotherm

**Tabla 4.25.** Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.

ASFALTO DE SALAMANCA CON EVOTHERM					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
2	1	933	433	53.59	53.23
	2	929	425	54.25	
	3	924	445	51.84	
4	4	921	275	70.14	69.83
	5	925	298	67.78	
	6	932	265	71.57	
8	7	918	207	77.45	77.44
	8	909	201	77.89	
	9	912	210	76.97	
16	10	929	120	87.08	86.79
	11	930	125	86.56	
	12	927	123	86.73	
32	13	908	0	100.00	100.00
	14	920	0	100.00	
	15	919	0	100.00	

En la gráfica 4.57 se muestran los resultados obtenidos de la prueba por envejecimiento del asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.



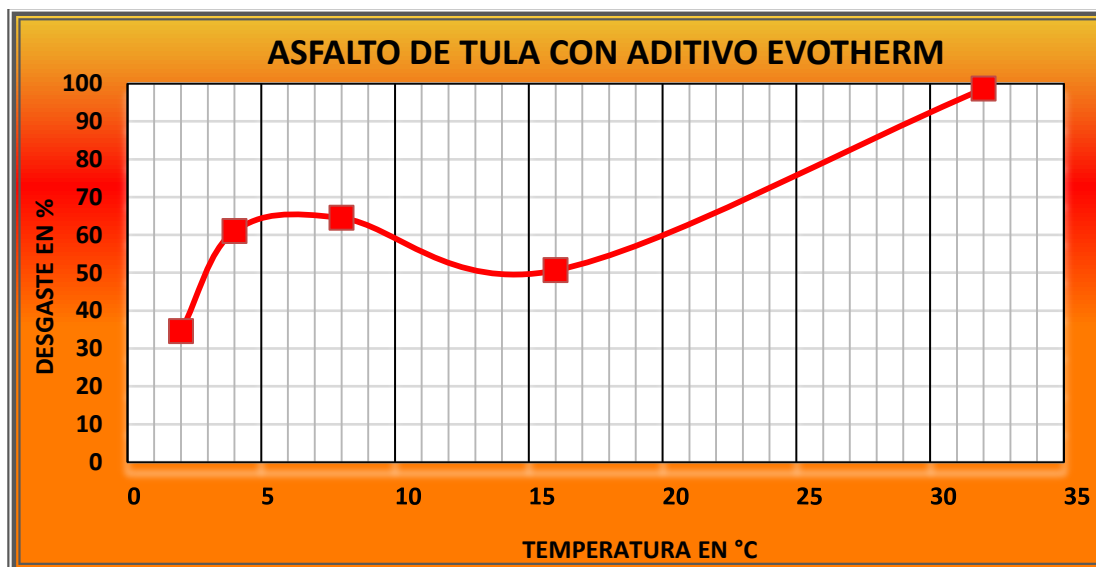
**Fig. 4.57.** Efecto del envejecimiento en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.

## 2. Asfalto de Tula con aditivo Evotherm

**Tabla 4.26.** Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.

ASFALTO DE TULA CON EVOTHERM					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
2	1	929	594	36.06	34.61
	2	936	602	35.68	
	3	926	629	32.07	
4	4	926	345	62.74	61.04
	5	938	375	60.02	
	6	926	367	60.37	
8	7	910	290	68.13	64.55
	8	910	345	62.09	
	9	916	335	63.43	
16	10	921	449	51.25	50.72
	11	918	455	50.44	
	12	921	456	50.49	
32	13	925	10	98.92	98.67
	14	930	12	98.71	
	15	927	15	98.38	

En la gráfica 4.58 se muestran los resultados obtenidos de la prueba por envejecimiento del asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.



**Fig. 4.58.** Efecto del envejecimiento en asfalto de Tula modificado con aditivo Evotherm.

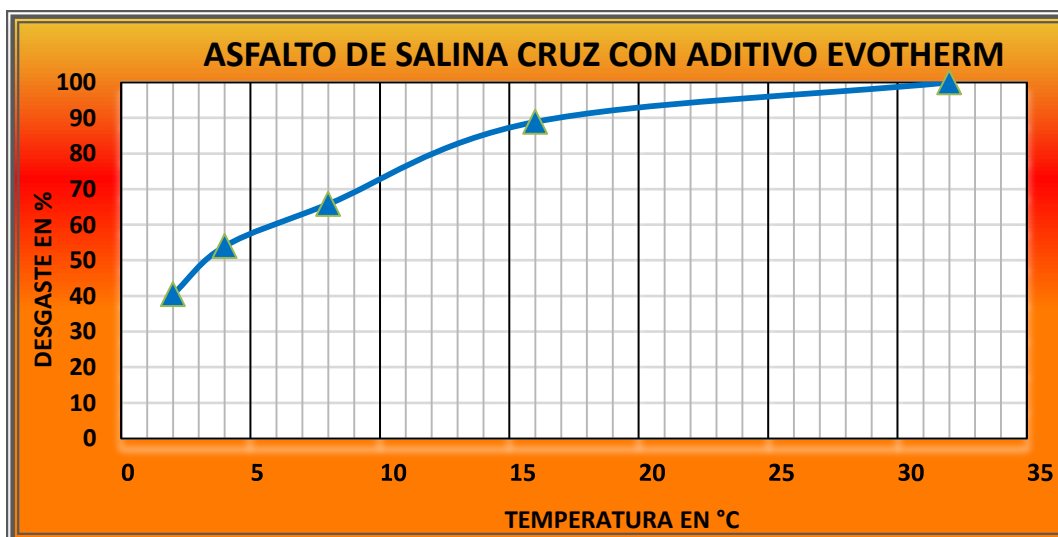


### 3. Asfalto de Salina Cruz con aditivo Evotherm

**Tabla 4.27.** Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.

ASFALTO DE SALINA CRUZ CON EVOTHERM					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
2	1	929	562	39.50	40.54
	2	932	540	42.06	
	3	934	560	40.04	
4	4	929	440	52.64	54.04
	5	932	425	54.40	
	6	935	420	55.08	
8	7	937	314	66.49	65.86
	8	935	332	64.49	
	9	934	312	66.60	
16	10	933	105	88.75	88.92
	11	911	102	88.80	
	12	927	100	89.21	
32	13	929	0	100.00	100.00
	14	925	0	100.00	
	15	937	0	100.00	

En la gráfica 4.59 se muestran los resultados obtenidos de la prueba por envejecimiento del asfalto de Salamanca modificado con aditivo Evotherm.



**Fig. 4.59.** Efecto del envejecimiento en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Evotherm.

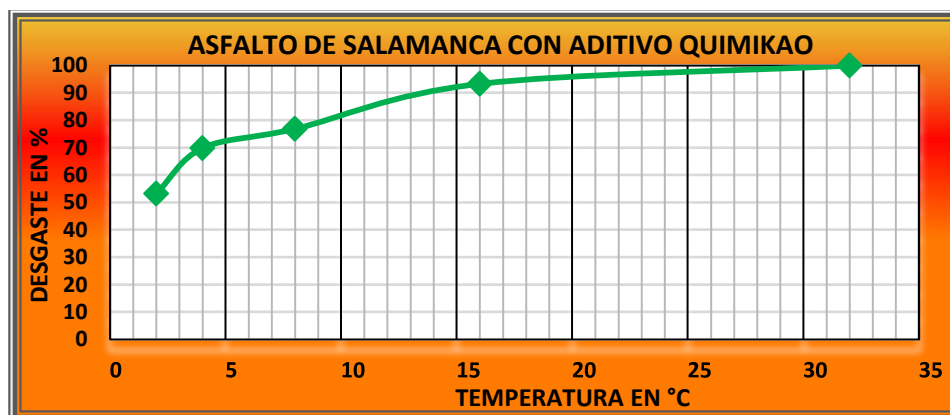
### 4.8.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR ENVEJECIMIENTO EN ASFALTOS CON ADITIVO QUIMIKAO

#### 1. Asfalto de Salamanca con aditivo de Quimikao

**Tabla 4.28.** Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Salamanca modificado aditivo Quimikao.

ASFALTO DE SALAMANCA CON QUIMIKAO					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
2	1	933	433	53.59	53.23
	2	929	425	54.25	
	3	924	445	51.84	
4	4	921	275	70.14	69.83
	5	925	298	67.78	
	6	932	265	71.57	
8	7	935	219	76.58	76.87
	8	937	218	76.73	
	9	934	212	77.30	
16	10	941	66	92.99	93.32
	11	938	62	93.39	
	12	935	60	93.58	
32	13	908	0	100.00	100.00
	14	920	0	100.00	
	15	919	0	100.00	

En la gráfica 4.60 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por envejecimiento del asfalto de Salamanca modificado con un aditivo Quimikao.



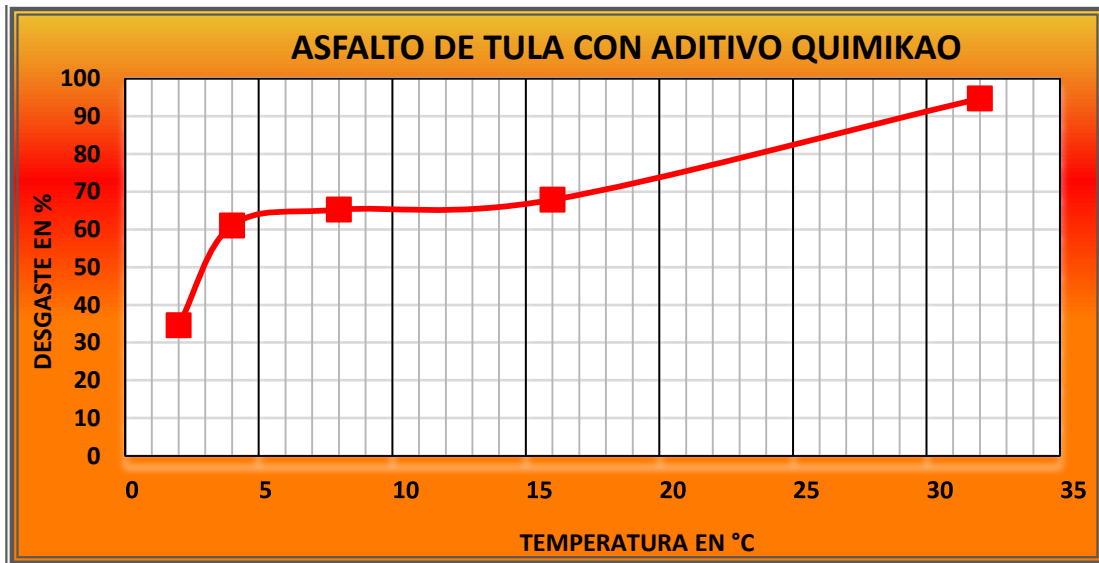
**Fig. 4.60.** Efecto del envejecimiento en asfalto de Salamanca modificado con aditivo Quimikao.

## 2. Asfalto de Tula con aditivo de Quimikao

**Tabla 4.29.** Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.

ASFALTO DE TULA CON QUIMIKAO					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
2	1	929	594	36.06	34.61
	2	936	602	35.68	
	3	926	629	32.07	
4	4	926	345	62.74	61.04
	5	938	375	60.02	
	6	926	367	60.37	
8	7	910	316	65.27	65.28
	8	910	322	64.62	
	9	916	312	65.94	
16	10	924	290	68.61	67.90
	11	929	301	67.60	
	12	932	303	67.49	
32	13	925	0	100.00	94.72
	14	930	80	91.40	
	15	927	67	92.77	

En la gráfica 4.61 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por envejecimiento del asfalto de Tula modificado con un aditivo Quimikao.



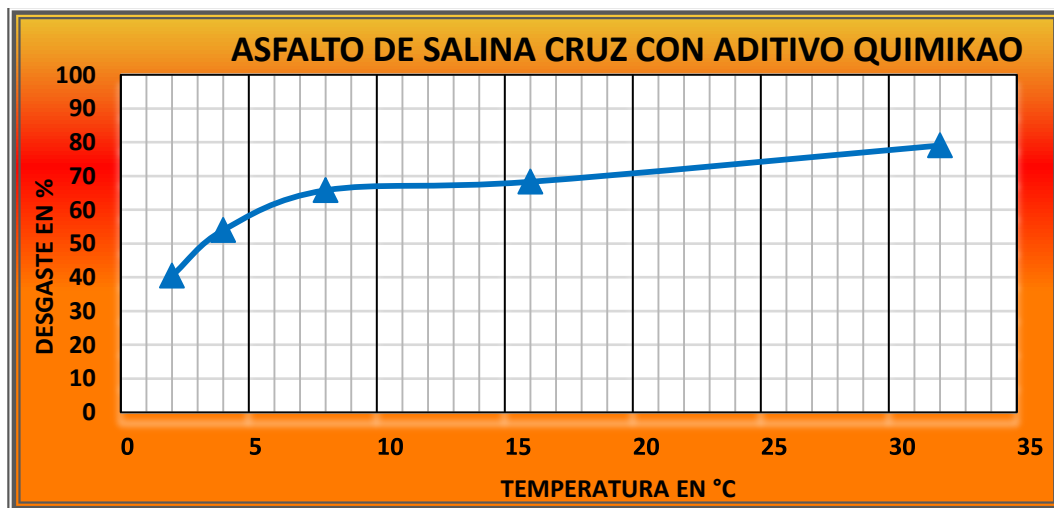
**Fig. 4.61.** Efecto del envejecimiento en asfalto de Tula modificado con aditivo Quimikao.

### 3. Asfalto de Salina Cruz con aditivo de Quimikao

**Tabla 4.30.** Resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.

ASFALTO DE SALINA CRUZ CON QUIMIKAO					
TEMPERATURA (°C)	PASTILLA N°	PESO INICIAL (Gr)	PESO FINAL (Gr)	PÉRDIDAS POR DESGASTE (%)	PROMEDIO
2	1	929	562	39.50	40.54
	2	932	540	42.06	
	3	934	560	40.04	
4	4	929	440	52.64	54.04
	5	932	425	54.40	
	6	935	420	55.08	
8	7	937	314	66.49	65.86
	8	935	332	64.49	
	9	934	312	66.60	
16	10	935	290	68.98	68.38
	11	933	295	68.38	
	12	937	302	67.77	
32	13	916	260	71.62	79.12
	14	929	198	78.69	
	15	928	120	87.07	

En la gráfica 4.62 se muestran los resultados obtenidos en la prueba por envejecimiento del asfalto de Salina Cruz modificado con un aditivo Quimikao.



**Fig. 4.62.** Efecto del envejecimiento en asfalto de Salina Cruz modificado con aditivo Quimikao.

## CAPÍTULO 5.-

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. CARTAS DE VISCOSIDAD VS TEMPERATURA

En la figura 5.1 se muestra la carta de viscosidad vs temperatura de los tres asfaltos estudiados en su estado natural (AC-20) y modificados con el aditivo Quimikao en la cual se aprecia la gran diferencia que existe en los rangos de temperatura de mezclado y compactación. Los asfaltos modificados presentan rangos de temperatura muy inferiores en comparación con los asfaltos AC-20.

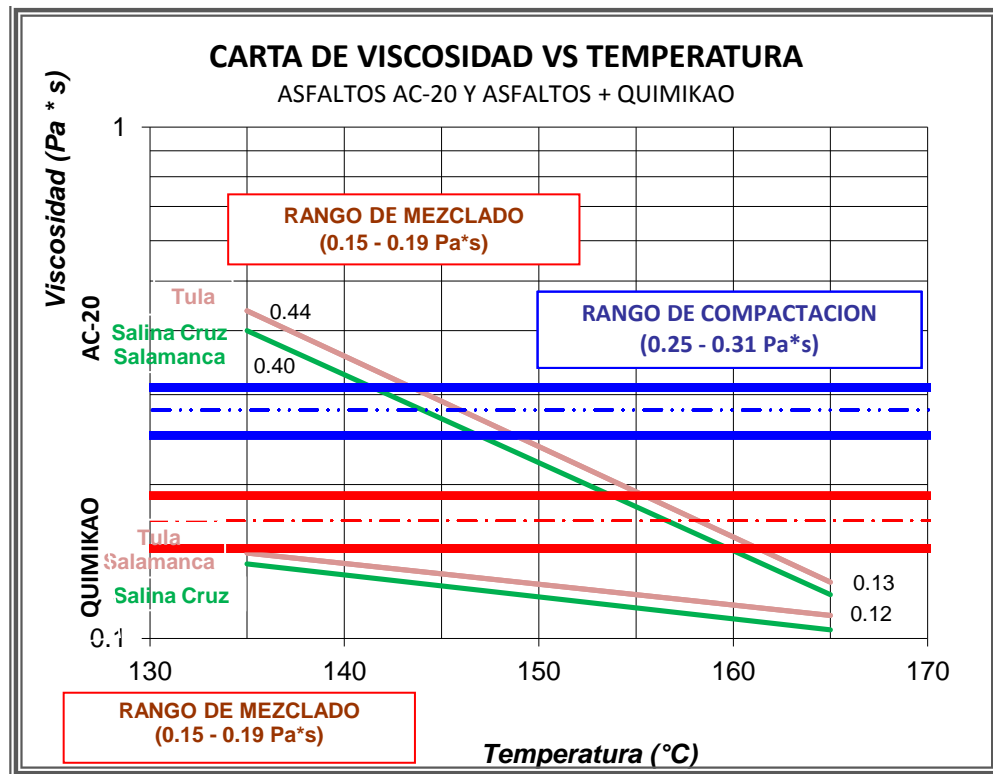


Fig. 5.1. Carta de viscosidad vs temperatura de los asfaltos estudiados.

## 5.2. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

En la tabla 5.1 se muestran los resultados de reología de los tres diferentes asfaltos AC-20 en donde se puede apreciar que los asfaltos de Tula y Salina Cruz tienen propiedades muy semejantes a diferencia del asfalto Salamanca.

**Tabla 5.1.** Resumen de resultados del ensayo DSR en asfaltos AC-20.

ASFALTOS AC-20					
ASFALTO AC-20	TEMPERATURA	ORIGINAL	DESPUÉS DEL RTFO	DESPUÉS DEL PAV	
	°C	G*/sin $\delta$ kPa	G*/sin $\delta$ kPa	Temperatura °C	G* sin $\delta$ kPa
Salamanca	64	1.817	9.270	31	1091
Tula	64	1.167	4.610	31	1831
Salina Cruz	64	1.243	4.045	31	1484
<b>CLASIFICACIÓN PG 64 -10</b>					

En la tabla 5.2 se muestran los resultados de reología de los tres diferentes asfaltos modificados con aditivo Quimikao, en donde se puede apreciar que los asfaltos de Salamanca y Tula tienen propiedades muy semejantes en la prueba de reología antes y después del RTFO, y que la prueba después del PAV los asfaltos de Tula y Salina Cruz se asemejan en sus propiedades.

**Tabla 5.2.** Resumen de resultados del ensayo DSR en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.

ASFALTOS CON ADITIVO QUIMIKAO					
ASFALTO + QUIMIKAO	TEMPERATURA	ORIGINAL	DESPUÉS DEL RTFO	DESPUÉS DEL PAV	
	°C	G*/sin $\delta$ kPa	G*/sin $\delta$ kPa	Temperatura °C	G* sin $\delta$ kPa
Salamanca	70	1.485	3.457	28	2177
Tula	70	1.504	3.105	28	744
Salina Cruz	70	1.608	2.482	28	750
<b>CLASIFICACIÓN PG 70 -22</b>					

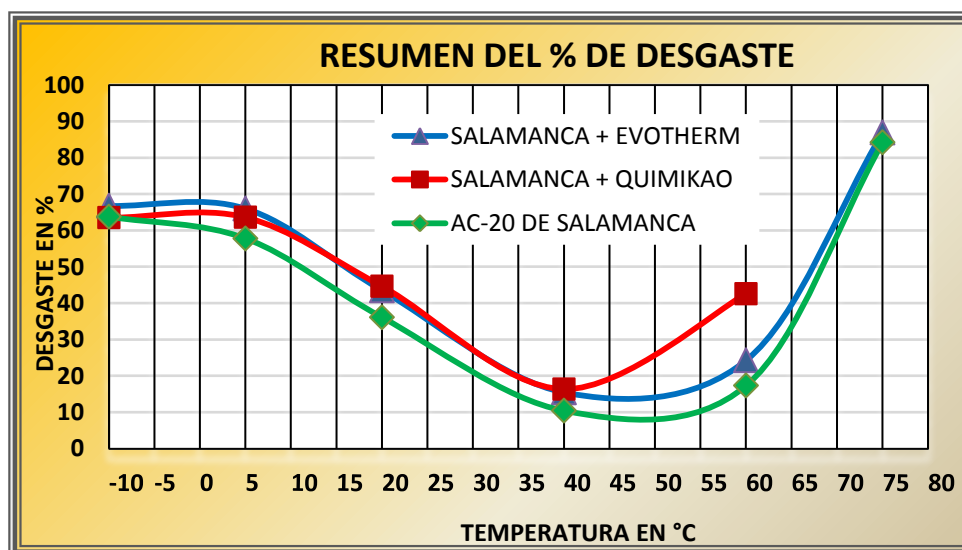
### 5.3. ANÁLISIS POR TEMPERATURA MÉTODO UCL®

- RESUMEN DE RESULTADOS DEL ASFALTO DE SALAMANCA EN SUS TRES FASES

En la tabla 5.3 se muestran los resultados de la prueba por temperatura del asfalto de Salamanca en sus tres fases en donde se puede apreciar que el asfalto AC-20 tiene menores pérdidas, esto debido a que se utilizaron las mismas temperaturas de prueba para los asfaltos y considerando que los aditivos disminuyen las viscosidad a las temperaturas de prueba bajaron tanto su viscosidad que sufrieron altas pérdidas.

**Tabla 5.3.** Resumen de resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Salamanca.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TEMPERATURA (°C)	AC-20 DE SALAMANCA	SALAMANCA + EVOTHERM	SALAMANCA + QUIMIKAO
-10	63.79	66.81	63.54
5	57.79	66.04	63.64
20	36.11	43.53	44.66
40	10.44	15.47	16.37
60	17.35	24.30	42.59
75	84.24	86.95	



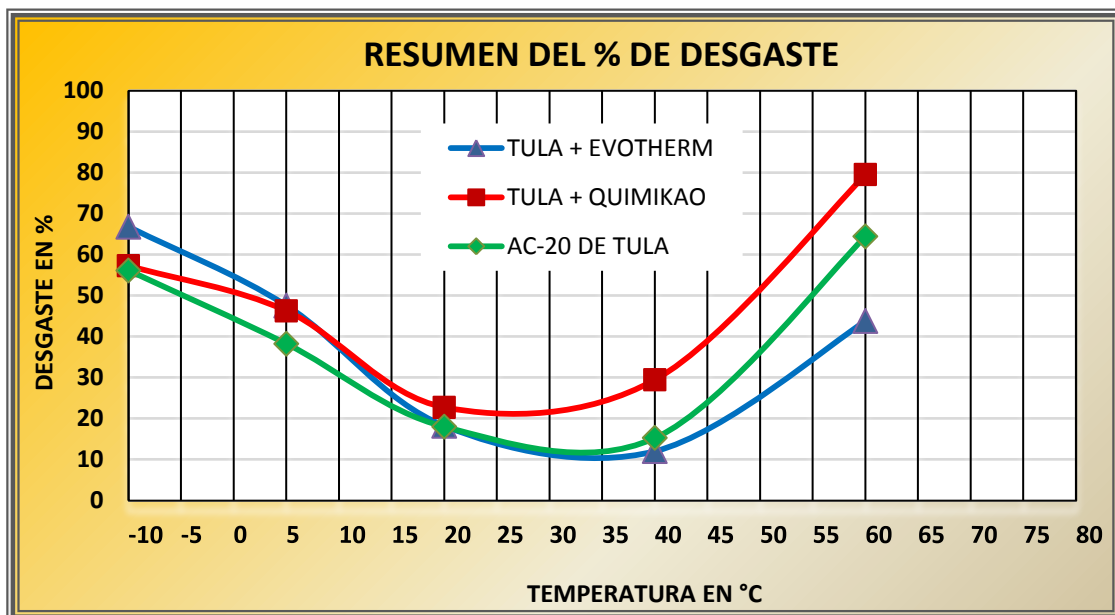
**Fig. 5.2.** Efecto de la temperatura en asfalto de Salamanca.

- **RESUMEN DE RESULTADOS DEL ASFALTO DE TULA EN SUS TRES FASES**

En la tabla 5.4 se muestran los resultados de la prueba por temperatura del asfalto de Tula en sus tres fases en donde se puede apreciar que el asfalto modificado con el aditivo Evotherm tiene un mejor comportamiento ya que es el que tiene menores pérdidas.

**Tabla 5.4.** Resumen de resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Tula.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TEMPERATURA (°C)	AC-20 DE TULA	TULA + EVOTHERM	TULA + QUIMIKAO
-10	56.13	66.81	57.30
5	38.24	47.57	46.28
20	18.01	18.23	22.72
40	15.29	12.07	29.47
60	64.45	43.81	79.56



**Fig. 5.3.** Efecto de la temperatura en asfalto de Tula.

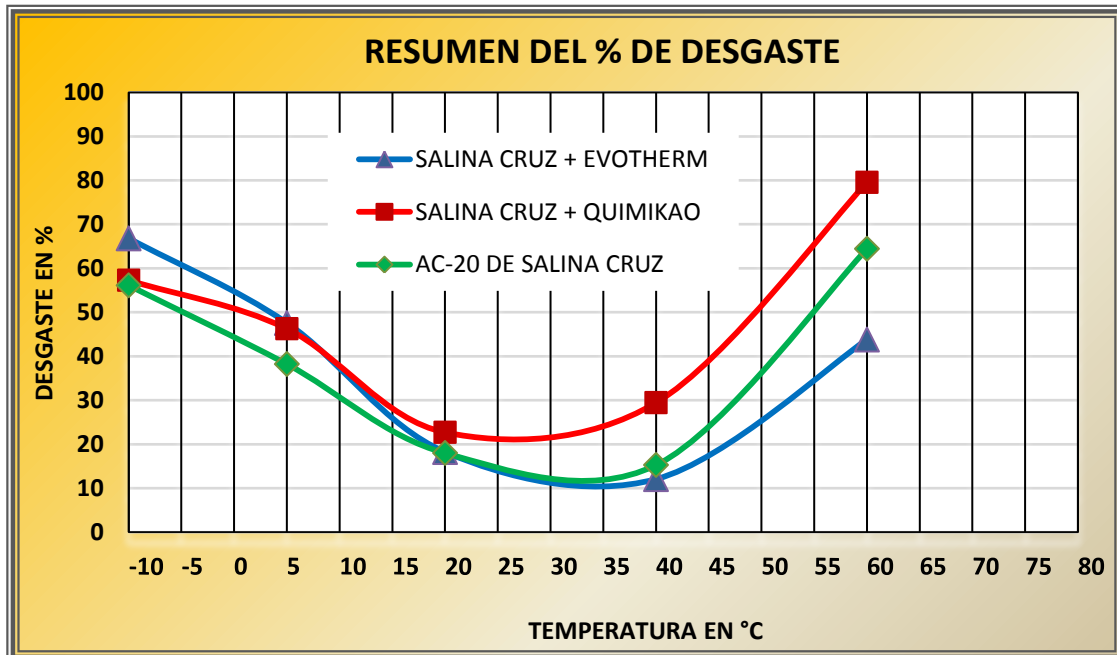


- **RESUMEN DE RESULTADOS DEL ASFALTO DE SALINA CRUZ EN SUS TRES FASES**

En la tabla 5.5 se muestran los resultados de la prueba por temperatura del asfalto de Salina Cruz en sus tres fases en donde se puede apreciar que el asfalto modificado con Evotherm tiene un mejor comportamiento a altas temperaturas.

**Tabla 5.5.** Resumen de resultados de la prueba por temperatura en asfalto de Salina Cruz.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TEMPERATURA (°C)	AC-20 DE SALINA CRUZ	SALINA CRUZ + EVOTHERM	SALINA CRUZ + QUIMIKAO
-10	55.36	59.99	51.58
5	39.05	42.89	42.33
20	13.70	15.89	23.45
40	20.15	15.47	33.79
60	73.75	53.09	86.77



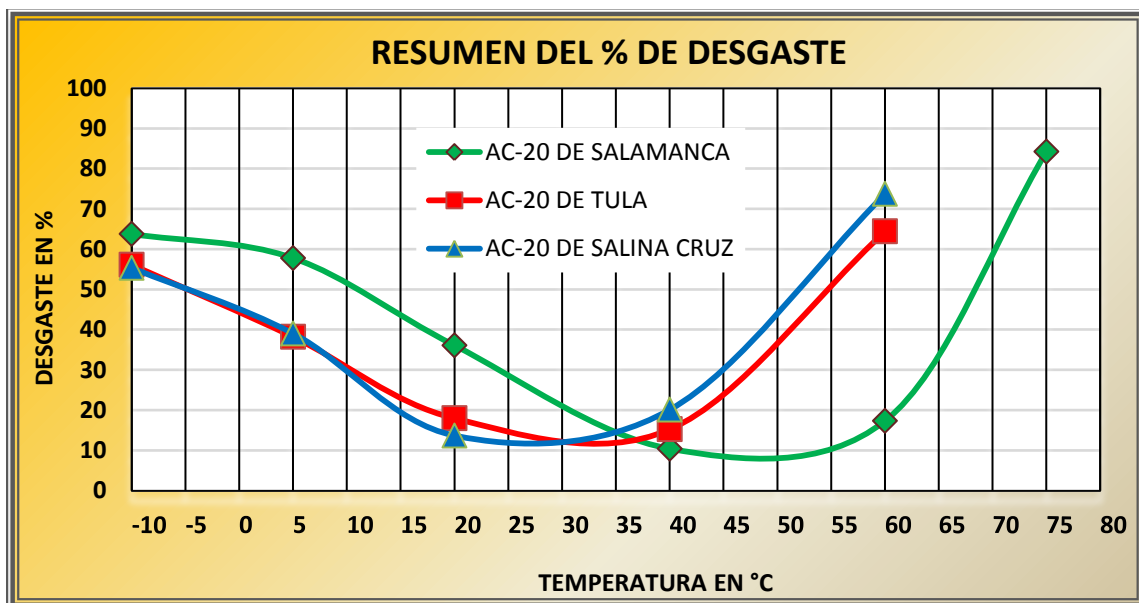
**Fig. 5.4.** Efecto de la temperatura en asfalto de Salina Cruz.

- **RESUMEN DE RESULTADOS DE ASFALTOS AC-20**

En la tabla 5.6 se muestran los resultados de la prueba por temperatura en los tres asfaltos AC-20, que el asfalto de Salamanca tiene un mejor comportamiento a altas temperaturas.

**Tabla 5.6.** Resumen de resultados de la prueba por temperatura en asfaltos AC-20.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TEMPERATURA (°C)	AC-20 DE SALAMANCA	AC-20 DE TULA	AC-20 DE SALINA CRUZ
-10	63.79	56.13	55.36
5	57.79	38.24	39.05
20	36.11	18.01	13.70
40	10.44	15.29	20.15
60	17.35	64.45	73.75
75	84.24		



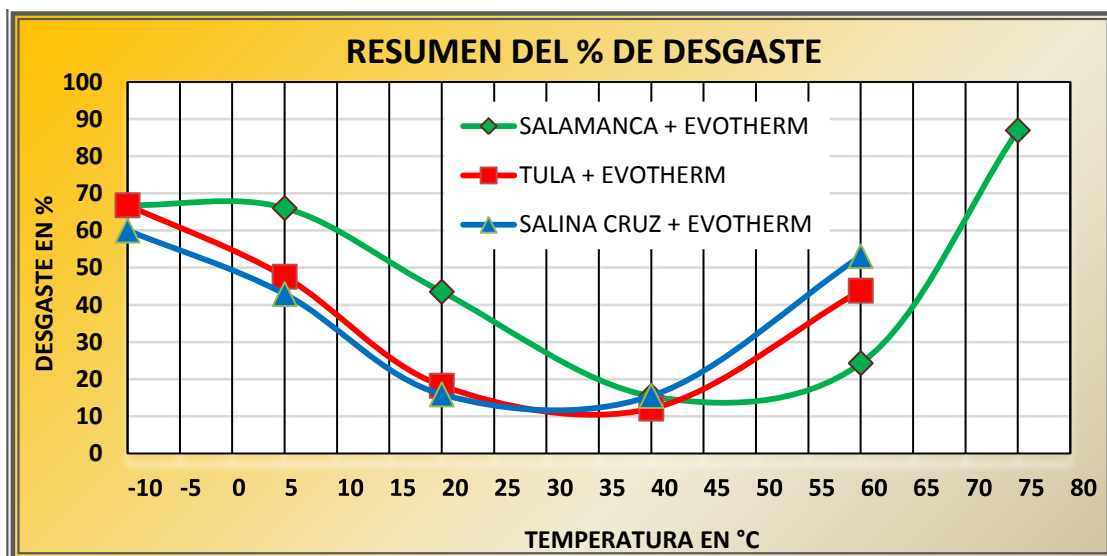
**Fig. 5.5.** Efecto de la temperatura en asfaltos AC-20.

- **RESUMEN DE RESULTADOS DE ASFALTOS MODIFICADOS CON ADITIVO EVOTHERM**

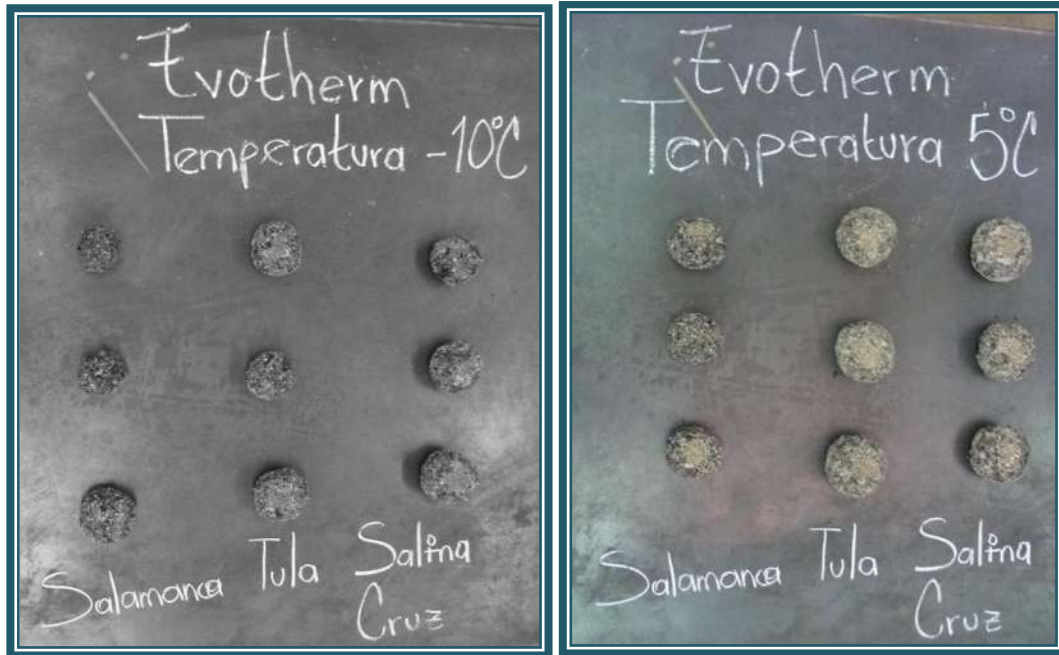
En la tabla 5.7 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la prueba por temperatura de los asfaltos modificados con aditivo Evotherm, en donde se aprecia que el asfalto de Salamanca se comporta mejor a altas temperaturas con respecto a los otros asfaltos.

**Tabla 5.7.** Resumen de resultados de la prueba por temperatura en asfaltos modificados con aditivo Evotherm.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TEMPERATURA (°C)	SALAMANCA + EVOTHERM	TULA + EVOTHERM	SALINA CRUZ + EVOTHERM
-10	66.81	66.81	59.99
5	66.04	47.57	42.89
20	43.53	18.23	15.89
40	15.47	12.07	15.47
60	24.30	43.81	53.09
75	86.95		



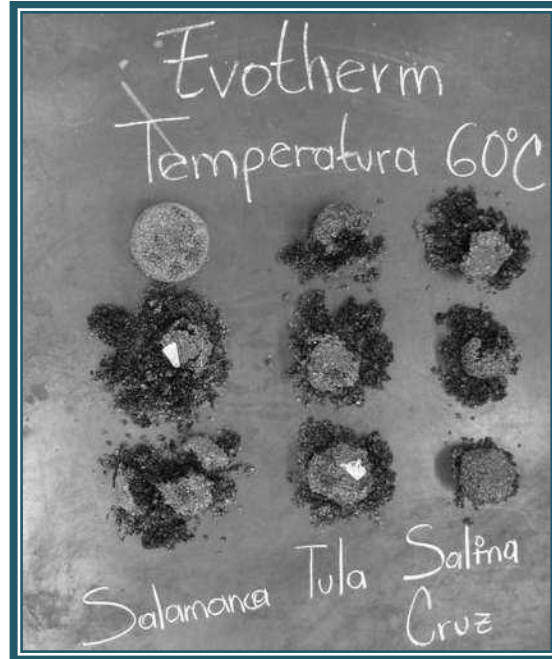
**Fig. 5.6.** Efecto de la temperatura en asfaltos modificados con aditivo Evotherm.



**Fig. 5.7.** Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles con efecto por temperatura.



**Fig. 5.8.** Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles con efecto por temperatura.



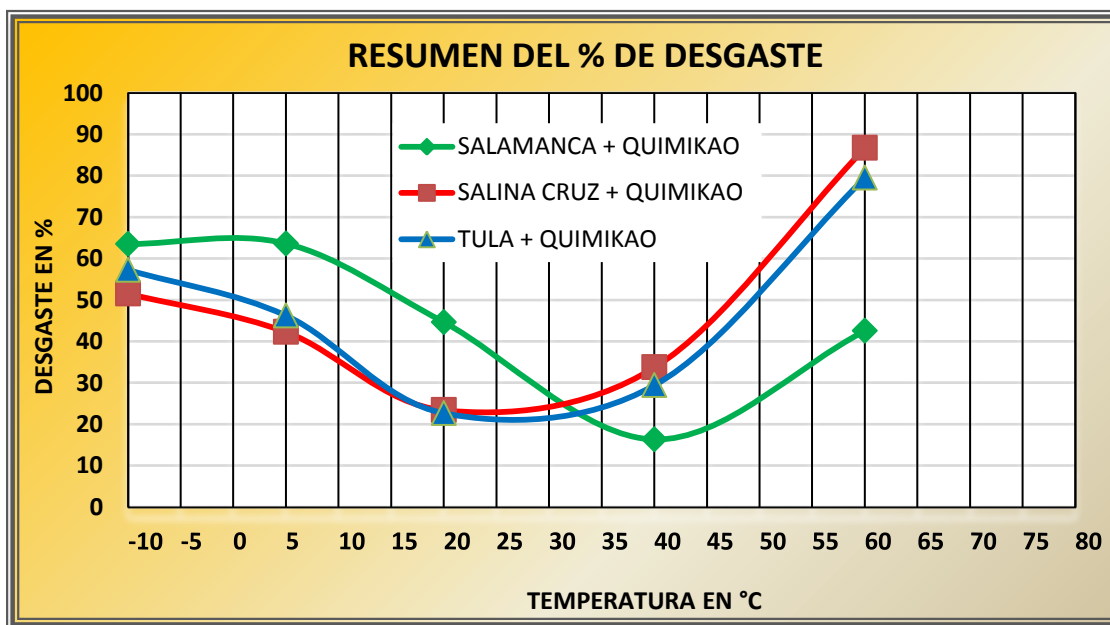
**Fig. 5.9.** Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles con efecto por temperatura.

- **RESUMEN DE RESULTADOS DE ASFALTOS MODIFICADOS CON ADITIVO QUIMIKAO**

En la tabla 5.8 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la prueba por temperatura de los asfaltos modificados con aditivo Quimikao, en donde se puede apreciar que los asfaltos de Tula y Salina Cruz tienen un comportamiento similar y que el asfalto de Salamanca sigue teniendo menores pérdidas a altas temperaturas.

**Tabla 5.8.** Resumen de resultados de la prueba por temperatura en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.

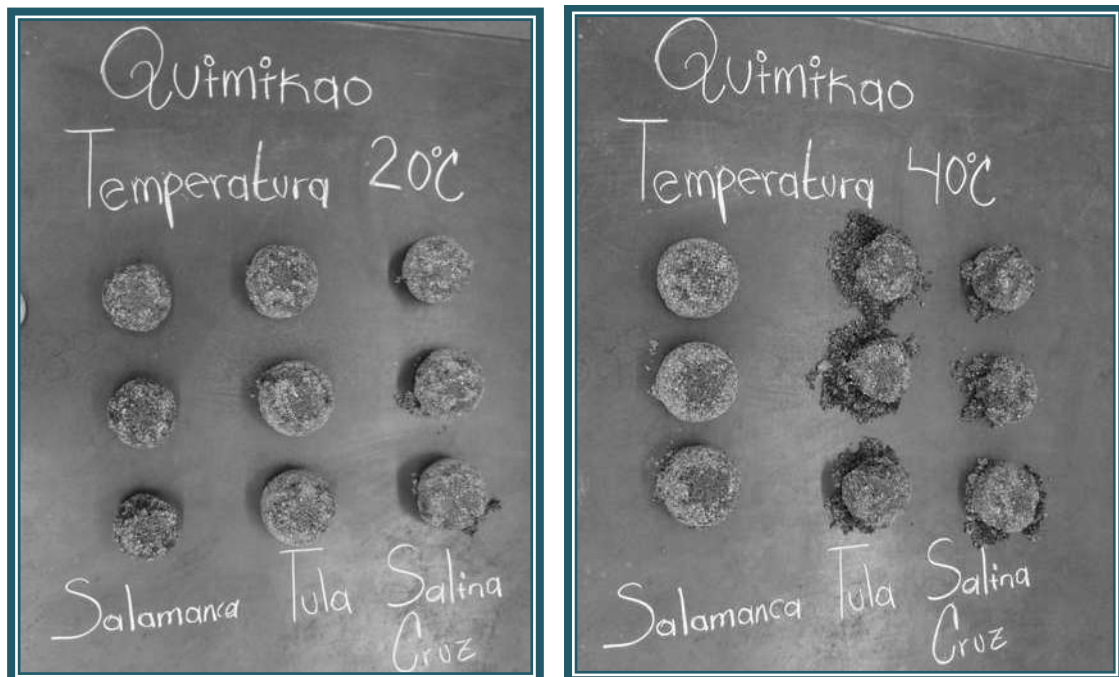
RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TEMPERATURA (°C)	SALAMANCA + QUIMIKAO	TULA + QUIMIKAO	SALINA CRUZ + QUIMIKAO
-10	63.54	57.30	51.58
5	63.64	46.28	42.33
20	44.66	22.72	23.45
40	16.37	29.47	33.79
60	42.59	79.56	86.77



**Fig. 5.10.** Efecto de la temperatura en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.

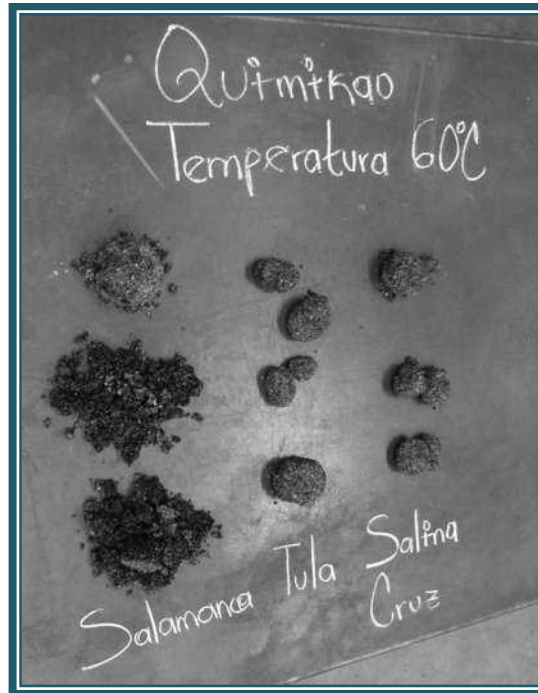


**Fig. 5.11.** Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por temperatura.



**Fig. 5.12.** Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por temperatura.





**Fig. 5.13.** Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por temperatura.



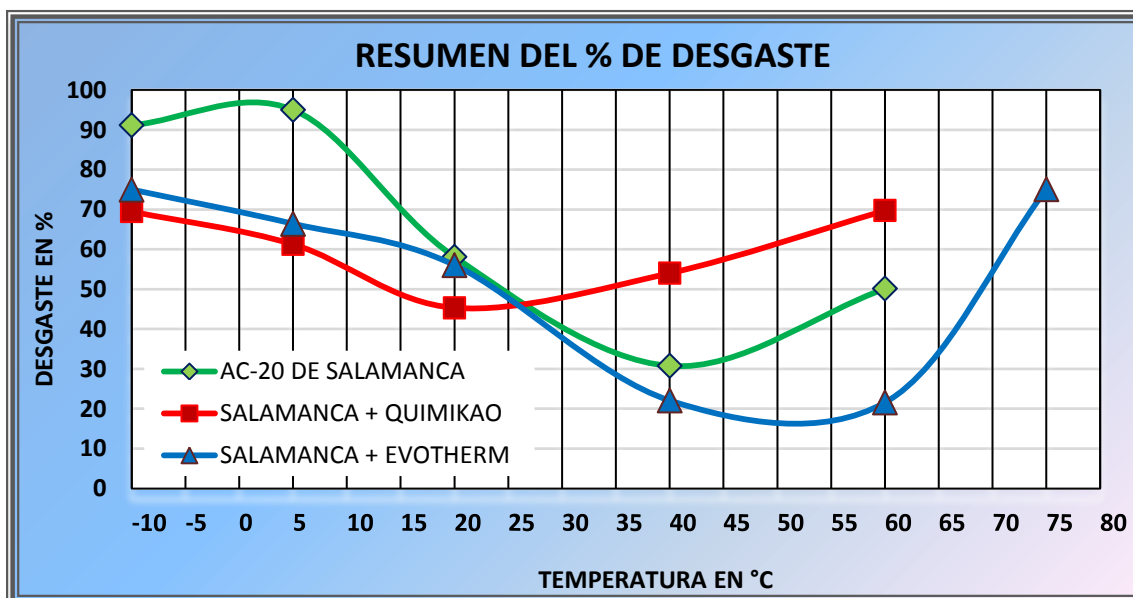
## 5.4. ANÁLISIS POR HUMEDAD MÉTODO UCL®

- RESUMEN DE RESULTADOS DEL ASFALTO DE SALAMANCA EN SUS TRES FASES

En la tabla 5.9 se muestran los resultados de la prueba por humedad del asfalto de Salamanca en sus tres fases en donde se puede apreciar que el asfalto modificado con aditivo Evotherm tiene un buen comportamiento a altas temperaturas disminuyendo las pérdidas en el ensayo Cántabro.

**Tabla 5.9.** Resumen de resultados de la prueba por humedad en asfalto de Salamanca.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TEMPERATURA (°C)	AC-20 SALAMANCA	SALAMANCA + EVOTHERM	SALAMANCA + QUIMIKAO
-10	91.19	74.99	69.52
5	95.03	66.42	61.28
20	58.13	56.04	45.33
40	30.79	22.09	54.05
60	50.18	21.59	69.78



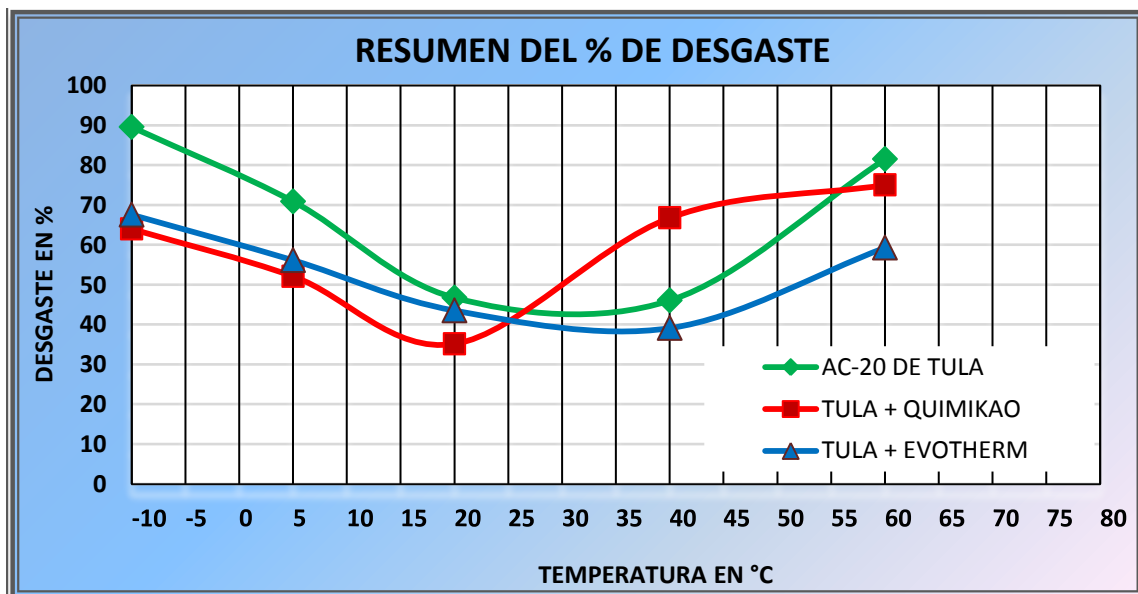
**Fig. 5.14.** Efecto de la humedad en asfalto de Salamanca.

- **RESUMEN DE RESULTADOS DEL ASFALTO DE TULA EN SUS TRES FASES**

En la tabla 5.10 se muestran los resultados de la prueba por humedad del asfalto de Tula en sus tres fases en donde se puede apreciar que el asfalto modificado con aditivo Evotherm tiene un buen comportamiento a altas temperaturas disminuyendo las pérdidas en el ensayo Cántabro.

**Tabla 5.10.** Resumen de resultados de la prueba por humedad en asfalto de Tula.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TEMPERATURA (°C)	AC-20 DE TULA	TULA + EVOTHERM	TULA + QUIMIKAO
-10	89.61	67.61	64.03
5	70.93	56.19	52.13
20	46.77	43.57	35.19
40	46.09	39.17	66.83
60	81.56	59.34	75.08



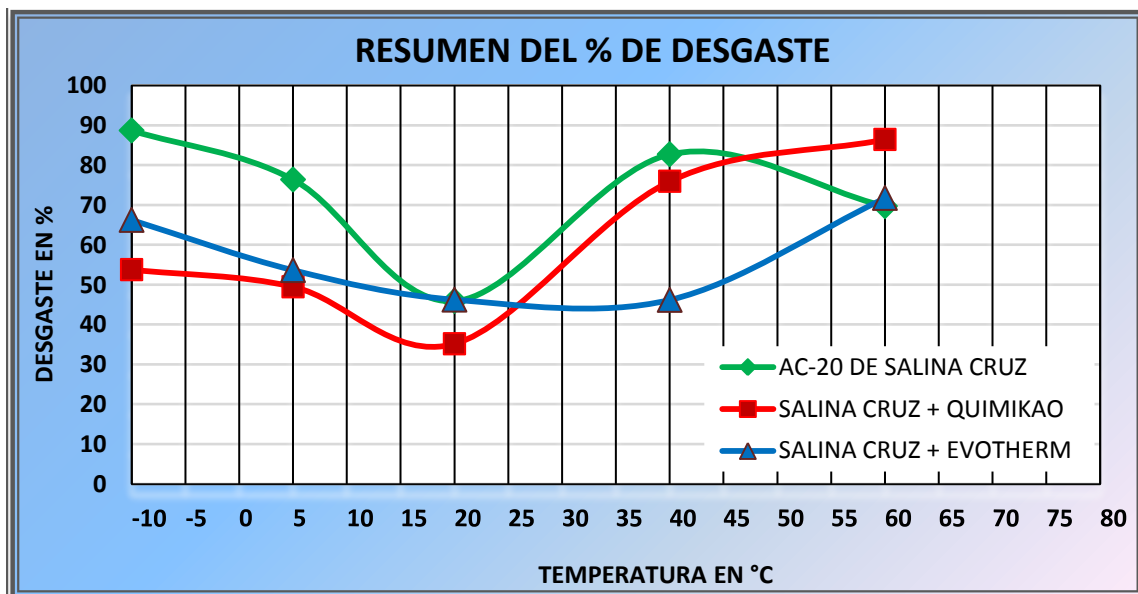
**Fig. 5.15.** Efecto de la humedad en asfalto de Tula.

- **RESUMEN DE RESULTADOS DEL ASFALTO DE SALINA CRUZ EN SUS TRES FASES**

En la tabla 5.11 se muestran los resultados de la prueba por humedad del asfalto de Salina Cruz en sus tres fases en donde se puede apreciar que el asfalto modificado con aditivo Evotherm tiene un buen comportamiento a altas temperaturas disminuyendo las pérdidas en el ensayo Cántabro.

**Tabla 5.11.** Resumen de resultados de la prueba por humedad en asfalto de Salina Cruz.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TEMPERATURA (°C)	AC-20 DE SALINA CRUZ	SALINA CRUZ + EVOTHERM	SALINA CRUZ + QUIMIKAO
-10	88.72	66.27	53.79
5	76.41	53.67	49.49
20	45.92	46.26	35.19
40	82.75	46.20	75.97
60	69.72	71.79	86.47



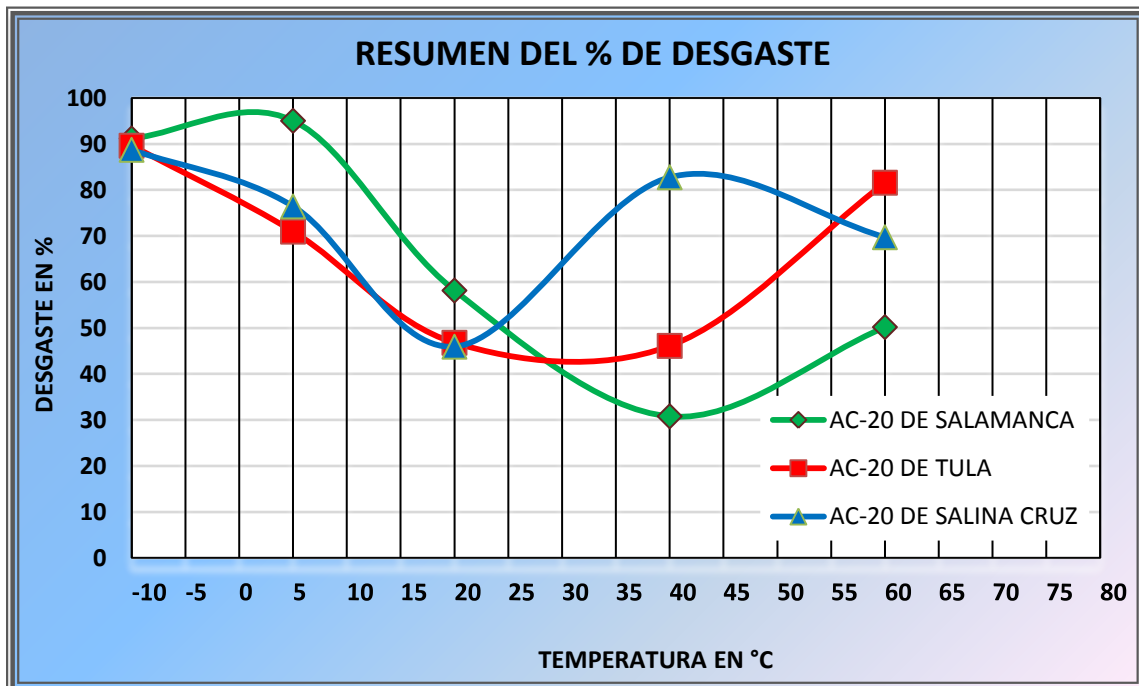
**Fig. 5.16.** Efecto de la humedad en asfalto de Salina Cruz.

- **RESUMEN DE RESULTADOS EN ASFALTOS AC-20**

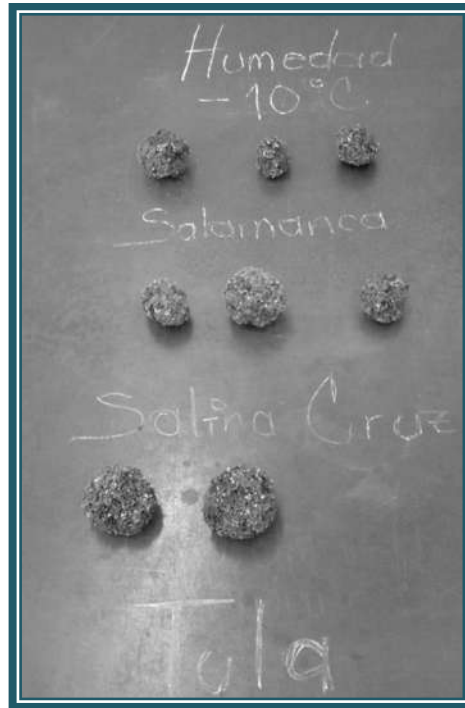
En la tabla 5.12 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la prueba por humedad de los asfaltos AC-20 donde se puede apreciar que el asfalto de Salamanca presenta el mejor comportamiento de la prueba a altas temperaturas.

**Tabla 5.12.** Resumen de los resultados de la prueba por humedad en asfaltos AC-20.

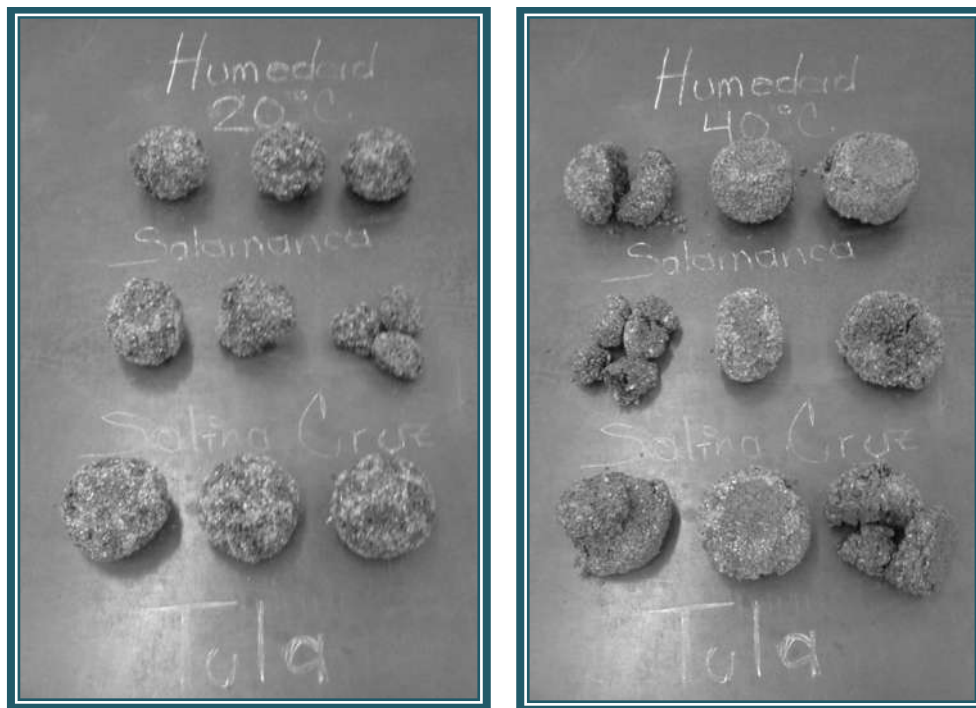
RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TEMPERATURA (°C)	AC-20 DE SALAMANCA	AC-20 DE TULA	AC-20 DE SALINA CRUZ
-10	91.19	89.61	88.72
5	95.03	70.93	76.41
20	58.13	46.77	45.92
40	30.79	46.09	82.75
60	50.18	81.56	69.72



**Fig. 5.17.** Efecto de la humedad en asfaltos AC-20.



**Fig. 5.18.** Probetas de asfaltos AC-20 después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por humedad.



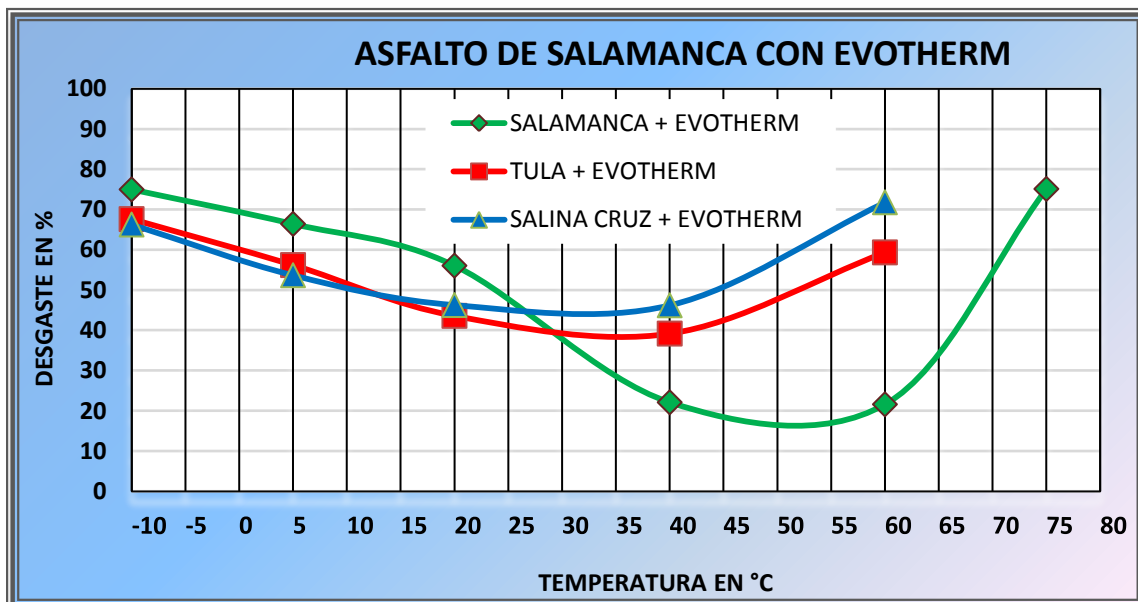
**Fig. 5.19.** Probetas de asfaltos AC-20 después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por humedad.

- **RESUMEN DE RESULTADOS EN ASFALTOS MODIFICADOS CON ADITIVO EVOTHERM**

En la tabla 5.13 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la prueba por humedad de los asfaltos modificados con aditivo Evotherm, en donde se aprecia considerablemente que el comportamiento de Salamanca tiene un mejor comportamiento con respecto de los otros asfaltos.

**Tabla 5.13.** Resumen de los resultados de la prueba por humedad en asfaltos modificados con aditivo Evotherm.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TEMPERATURA (°C)	SALAMANCA + EVOTHERM	TULA + EVOTHERM	SALINA CRUZ + EVOTHERM
-10	74.99	67.61	66.27
5	66.42	56.19	53.67
20	56.04	43.57	46.26
40	22.09	39.17	46.20
60	21.59	59.34	71.79



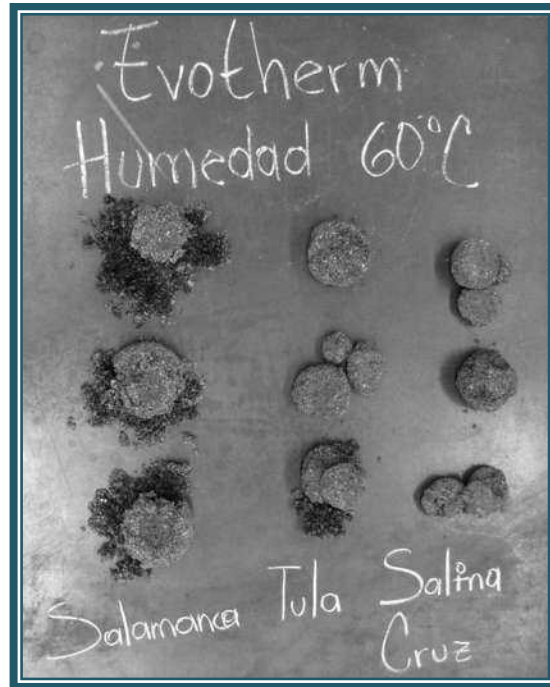
**Fig. 5.20.** Efecto de la humedad en asfaltos modificados con aditivo Evotherm.



**Fig. 5.21.** Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles con efecto por humedad.



**Fig. 5.22.** Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles con efecto por humedad.



**Fig. 5.23.** Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles con efecto por humedad.

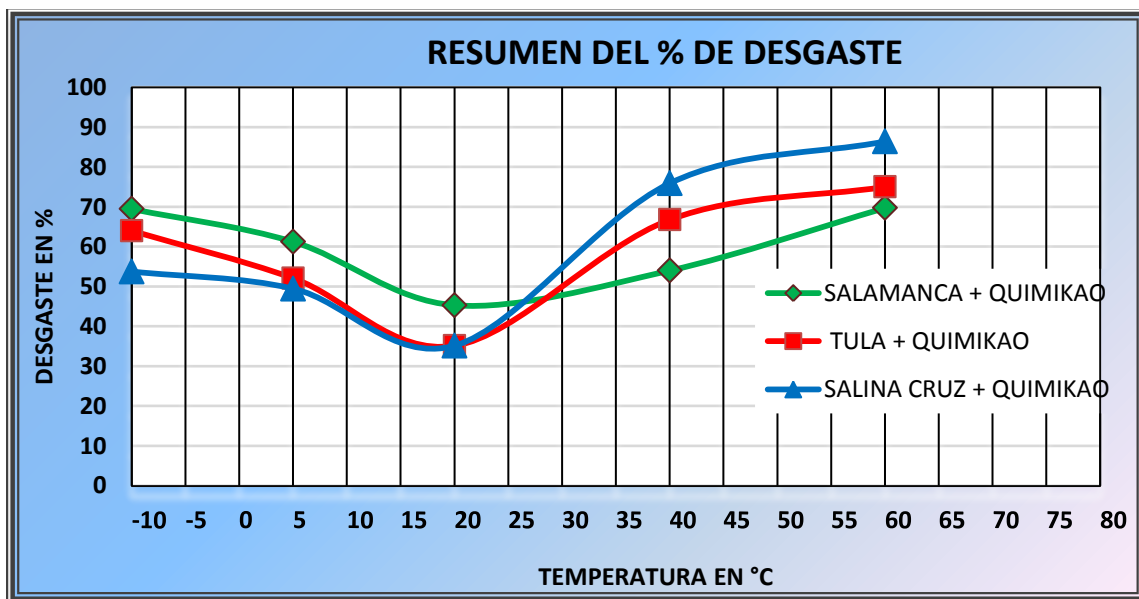


- **RESUMEN DE RESULTADOS EN ASFALTOS MODIFICADOS CON ADITIVO EVOTHERM**

En la tabla 5.14 se muestran un resumen de los resultados obtenidos de la prueba por humedad, de los asfaltos modificados con un aditivo Quimikao, donde se aprecia que el asfalto de Salamanca con aditivo Quimikao presenta el mejor comportamiento de la prueba a altas temperaturas

**Tabla 5.14.** Resumen de los resultados de la prueba por humedad en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TEMPERATURA (°C)	SALAMANCA + QUIMIKAO	TULA + QUIMIKAO	SALINA CRUZ + QUIMIKAO
-10	69.52	64.03	53.79
5	61.28	52.13	49.49
20	45.33	35.19	35.19
40	54.05	66.83	75.97
60	69.78	75.08	86.47



**Fig. 5.24.** Efecto de la humedad en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.



**Fig. 5.25.** Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por humedad.



**Fig. 5.26.** Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por humedad.

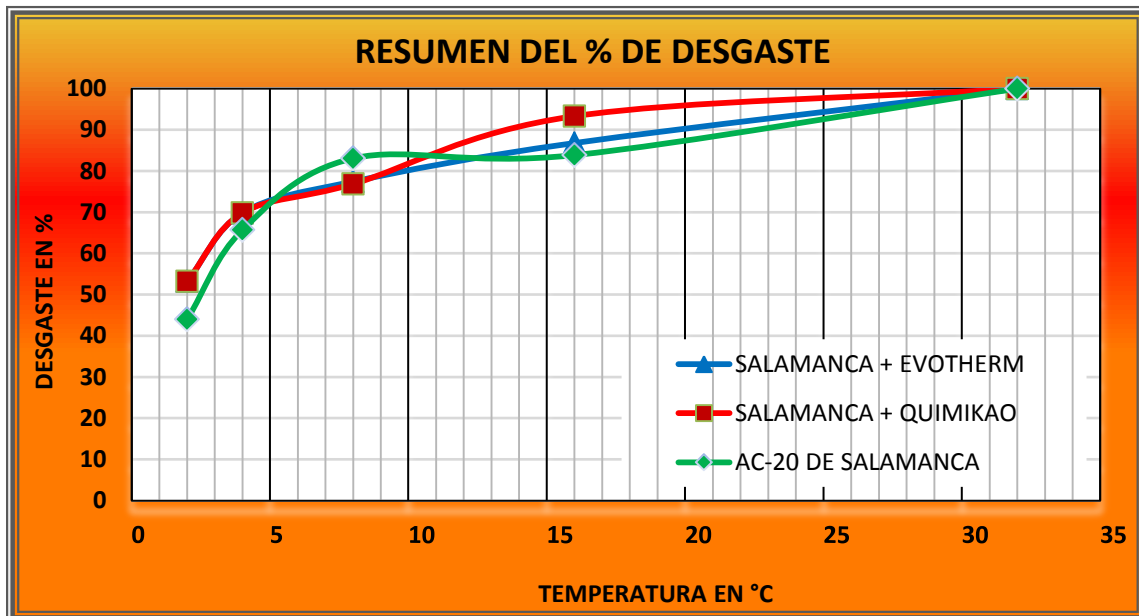
## 5.5. ANÁLISIS POR ENVEJECIMIENTO MÉTODO UCL®

- RESUMEN DE RESULTADOS DEL ASFALTO DE SALAMANCA EN SUS TRES FASES

En la tabla 5.15 se muestran los resultados de la prueba por envejecimiento del asfalto de Tula en sus tres fases en donde se puede apreciar que los el asfalto AC-20 tienen el mejor comportamiento a altas temperaturas.

**Tabla 5.15.** Resumen de resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Salamanca.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TIEMPO HR)	AC-20 DE SALAMANCA	SALAMANCA + EVOTHERM	SALAMANCA + QUIMIKAO
2	44.01	53.23	53.23
4	65.71	69.83	69.83
8	83.07	77.44	76.87
16	83.87	86.79	93.32
32	100	100	100



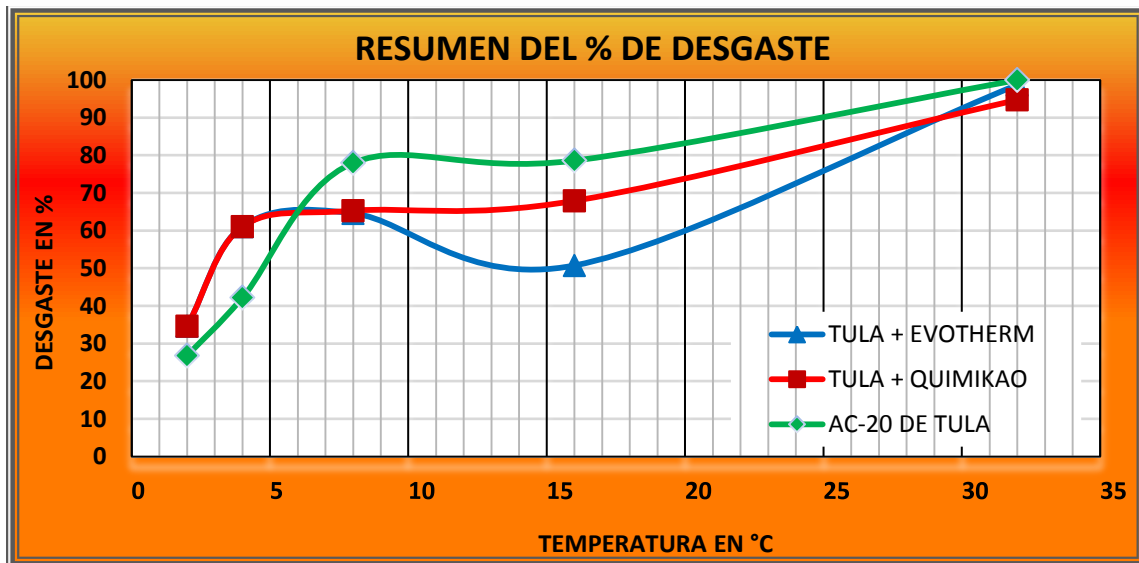
**Fig. 5.27.** Efecto del envejecimiento en asfalto de Salamanca.

- **RESUMEN DE RESULTADOS DEL ASFALTO DE TULA EN SUS TRES FASES**

En la tabla 5.16 se muestran los resultados de la prueba por envejecimiento del asfalto de Tula en sus tres fases en donde se puede apreciar que el asfalto modificado con Evotherm presenta un mejor comportamiento en mayor tiempo de envejecimiento.

**Tabla 5.16.** Resumen de resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Tula.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TIEMPO (HR)	AC-20 DE TULA	TULA + EVOTHERM	TULA + QUIMIKAO
2	26.81	34.61	34.61
4	42.21	61.04	61.04
8	77.99	64.55	65.28
16	78.61	50.72	67.9
32	100	98.67	94.72



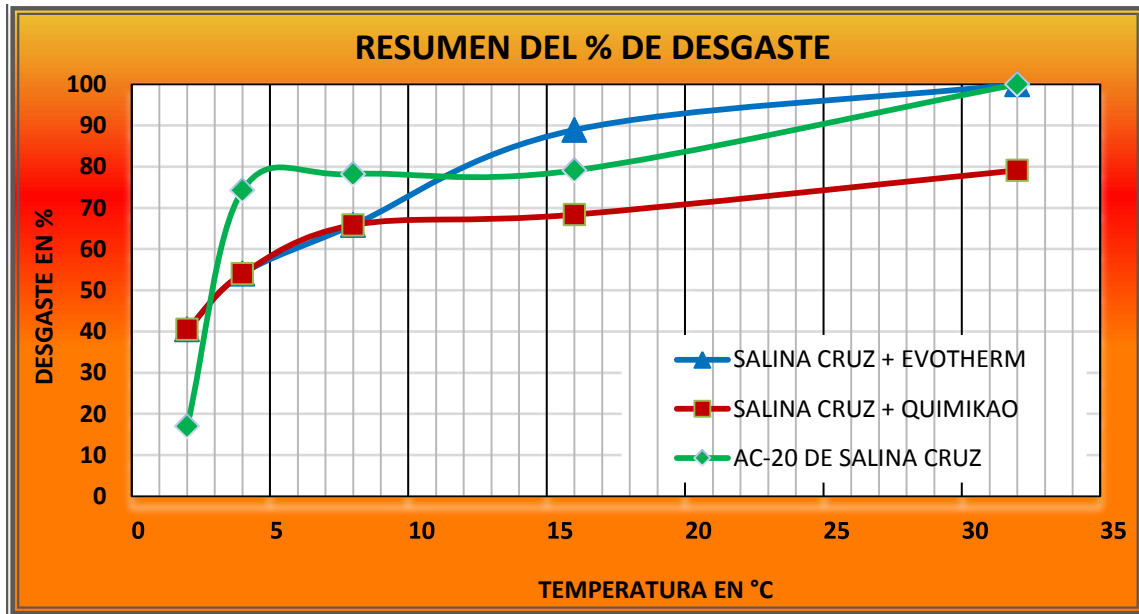
**Fig. 5.28.** Efecto del envejecimiento en asfalto de Tula.

- **RESUMEN DE RESULTADOS DEL ASFALTO DE SALINA CRUZ EN SUS TRES FASES**

En la tabla 5.17 se muestran los resultados de la prueba por envejecimiento del asfalto de Salina Cruz en sus tres fases en donde se puede apreciar que el asfalto modificado con el aditivo Quimikao es el que presenta menores pérdidas en mayor tiempo de envejecimiento.

**Tabla 5.17.** Resumen de resultados de la prueba por envejecimiento en asfalto de Salina Cruz.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TIEMPO (HR)	AC-20 DE SALINA CRUZ	SALINA CRUZ + EVOTHERM	SALINA CRUZ + QUIMIKAO
2	17	40.54	40.54
4	74.26	54.04	54.04
8	78.21	65.86	65.86
16	79.11	88.92	68.38
32	100	100	79.12



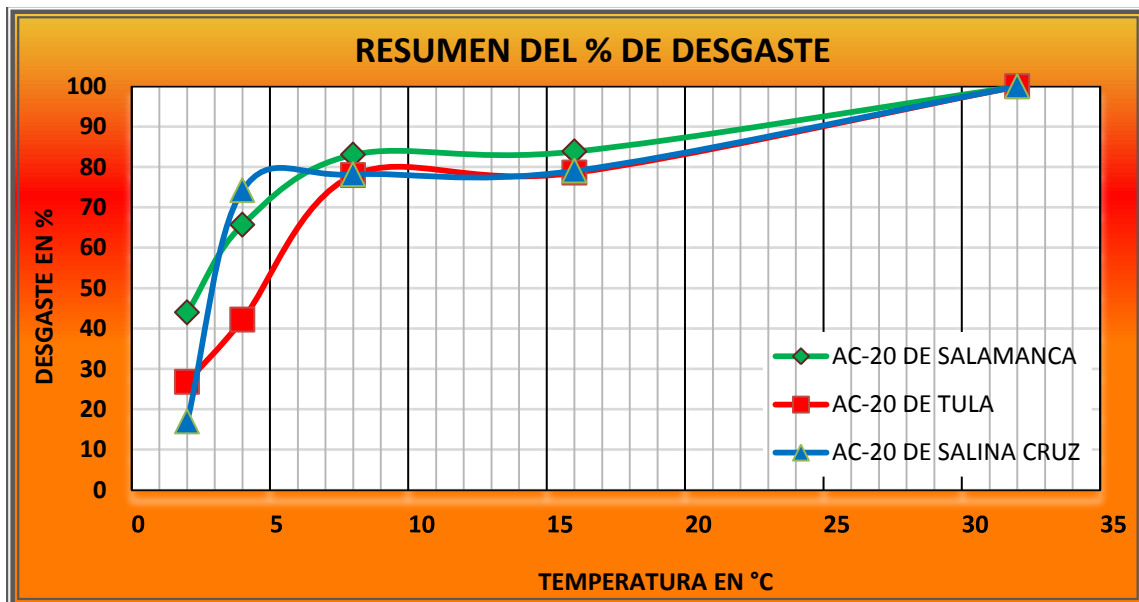
**Fig. 5.29.** Efecto del envejecimiento en asfalto de Salina Cruz.

En la tabla 5.18 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la prueba por temperatura de los asfaltos AC-20, donde se aprecia que el asfalto AC-20 de Salamanca presenta menores pérdidas en el mayor tiempo de envejecimiento.

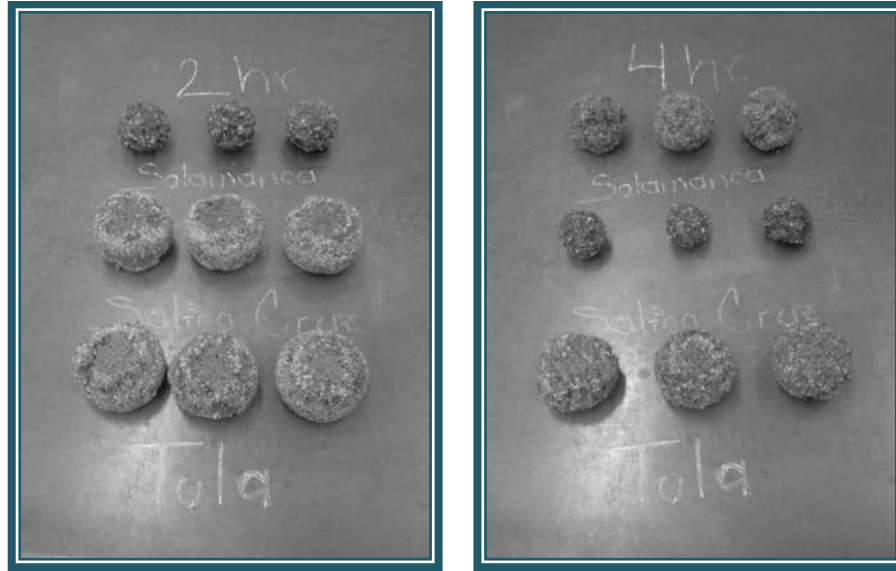
- **RESUMEN DE RESULTADOS EN ASFALTOS AC-20**

**Tabla 5.18.** Resumen de los resultados de la prueba por envejecimiento en asfaltos AC-20.

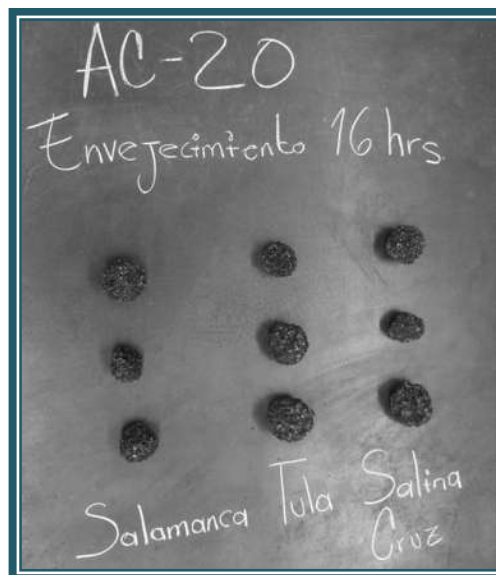
RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TIEMPO (HR)	AC-20 DE	AC-20 DE	AC-20 DE
	SALAMANCA	TULA	SALINA CRUZ
2	44.01	26.81	17.00
4	65.71	42.21	74.26
8	83.07	77.99	78.21
16	83.87	78.61	79.11
32	100.00	100.00	100.00



**Fig. 5.30.** Efecto del envejecimiento en asfaltos AC-20.



**Fig. 5.31.** Probetas de asfaltos AC-20 después de la prueba de los Ángeles con efecto por envejecimiento.



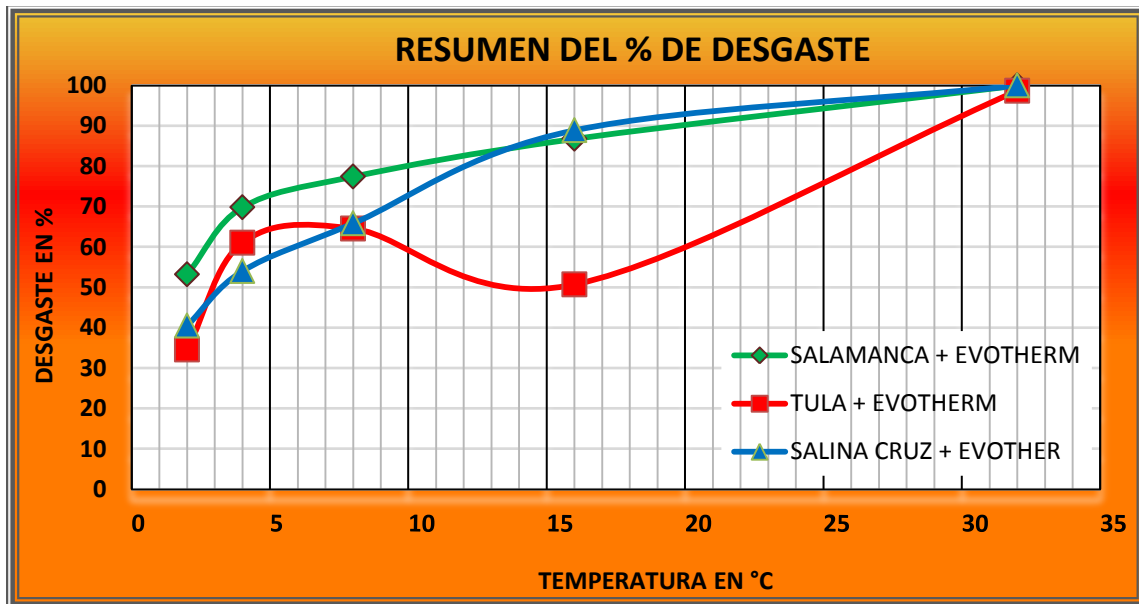
**Fig. 5.32.** Probetas de asfaltos AC-20 después de la prueba de los Ángeles con efecto por envejecimiento.

- **RESUMEN DE RESULTADOS EN ASFALTOS MODIFICADOS CON ADITIVO EVOTHERM**

En la tabla 5.19 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de la prueba por envejecimiento de los asfaltos modificados con aditivo Evotherm, donde se aprecia que el mejor comportamiento lo presenta el asfalto de Tula.

**Tabla 5.19.** Resumen de los resultados de la prueba por envejecimiento en asfaltos modificados con aditivo Evotherm.

RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TIEMPO (HR)	SALAMANCA + EVOTHERM	TULA + EVOTHERM	SALINA CRUZ + EVOTHERM
2	53.23	34.61	40.54
4	69.83	61.04	54.04
8	77.44	64.55	65.86
16	86.79	50.72	88.92
32	100.00	98.67	100.00



**Fig. 5.33.** Efecto del envejecimiento en asfaltos modificados con aditivo Evotherm.





**Fig. 5.34.** Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles.



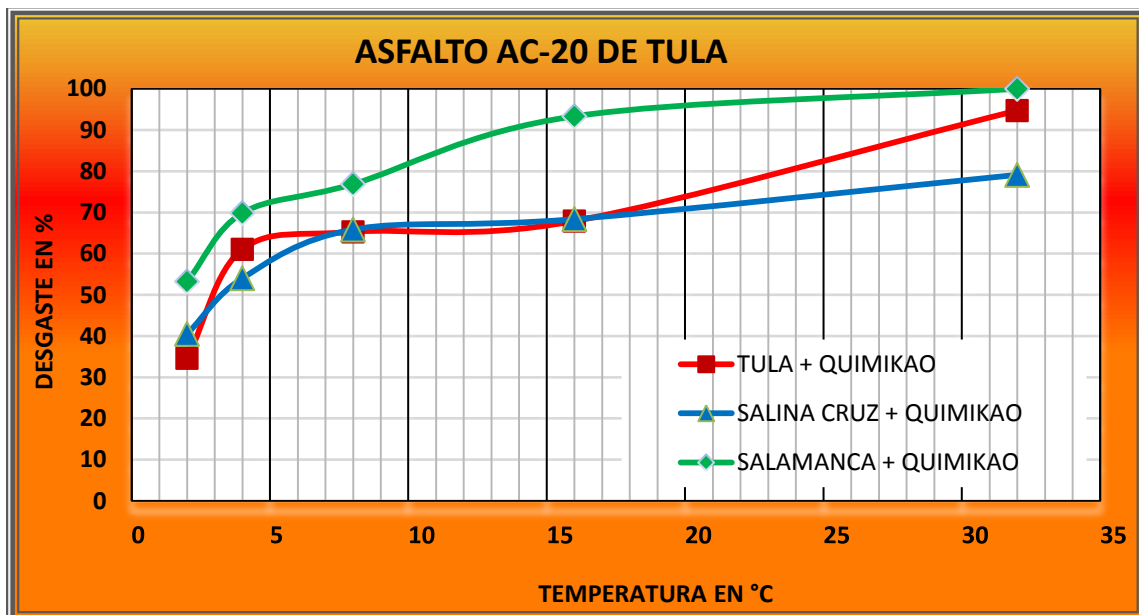
**Fig. 5.35.** Probetas de asfaltos con aditivo Evotherm después de la prueba de los Ángeles.

- **RESUMEN DE RESULTADOS EN ASFALTOS MODIFICADOS CON ADITIVO QUIMIKAO**

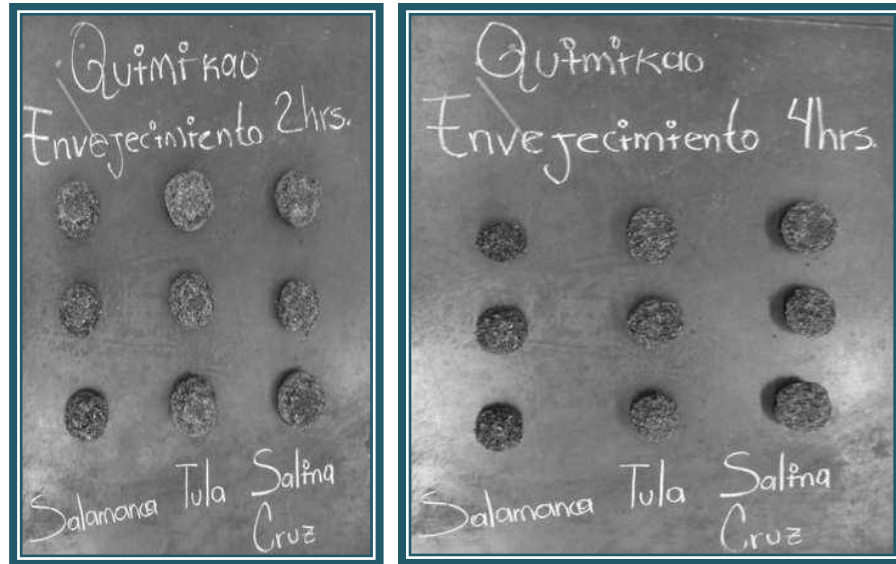
En la tabla 5.20 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la prueba por envejecimiento de los asfaltos modificados con un aditivo Quimikao, donde se aprecia que el mejor comportamiento presentando menores pérdidas lo tiene el asfalto de Salina Cruz.

**Tabla 5.20.** Resumen de los resultados de la prueba por envejecimiento en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.

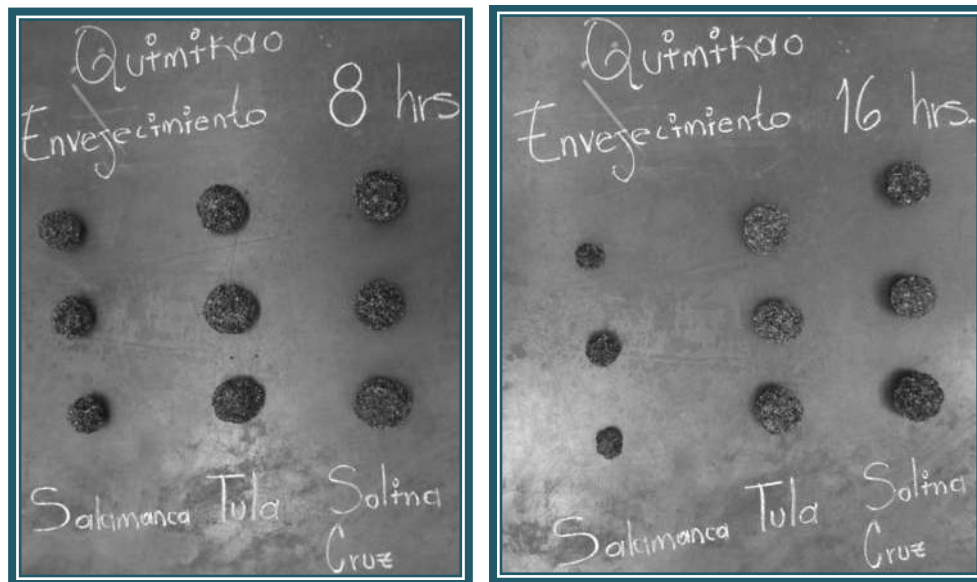
RESUMEN DEL % DE DESGASTE			
TIEMPO (HR)	SALAMANCA + QUIMIKAO	TULA + QUIMIKAO	SALINA CRUZ + QUIMIKAO
2	53.23	34.61	40.54
4	69.83	61.04	54.04
8	76.87	65.28	65.86
16	93.32	67.90	68.38
32	100.00	94.72	79.12



**Fig. 5.36.** Efecto del envejecimiento en asfaltos modificados con aditivo Quimikao.



**Fig. 5.37.** Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por envejecimiento.



**Fig. 5.38.** Probetas de asfaltos con aditivo Quimikao después de la prueba de desgaste de los Ángeles con efecto por envejecimiento.

## CONCLUSIONES

Se estudiaron asfaltos mexicanos AC-20 de tres refinerías diferentes y los resultados nos indican que presentan propiedades diferentes. Las pruebas de reología presentaron alta correlación con los resultados del Método UCL<sup>®</sup>, los cuales confirman la similitud de las propiedades de los asfaltos de las refinerías de Tula y Salina Cruz y una alta diferencia con las propiedades del asfalto de Salamanca. Esto es muy importante, ya que podemos comprobar que el Método UCL<sup>®</sup> es confiable para obtener las propiedades de las mezclas asfálticas y es mucho más barato que realizar los análisis de reología por el Método de SUPERPAVE.

Con la utilización de los aditivos empleados podemos observar que mejoran las propiedades del asfalto al lograr disminuir su viscosidad, y por tanto las temperaturas de mezclado, tendido y compactación, lo cual se ve transformado en un beneficio medioambiental y de aumento de durabilidad.

---

## BIBLIOGRAFÍA

1. Álvaro Gutiérrez Muñiz, Luis Taul Valenzuela Sánchez; 2008; Desarrollo de mezclas asfálticas tibias en México; 4 pág.
2. Protocolo AMAAC (2008), Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño
3. Álvaro Gutiérrez Muñiz; 2009; Seminario de emulsiones asfálticas y aplicaciones, Los Cabos, 10 pág.
4. Sundaram Logaraj, Akzo Nobel Surface Chemistry LLC, Ângelo Almeida, Akzo Nobel Ltda; 2008; Aditivo surfactante para asfalto usado en mezclas asfálticas tibias con propiedades de adhesión, 3 pág.
5. STC; 2008; Manual estadístico, 4 pág.
6. Oscar Javier Reyes-Ortiz, Universidad, Félix E. Pérez-Jiménez, Rodrigo Miro Recacens, José Amoros Parras, Santiago Gil Redondo; 2008; El proyecto Fenix en la upc. mezclas Semi-Calientes, 4 pág.
7. [http://www.tecnun.es/asignaturas/ecologia/hipertexto/10CAtm1/350CaCl\\_i.htm](http://www.tecnun.es/asignaturas/ecologia/hipertexto/10CAtm1/350CaCl_i.htm)
8. [http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_invernadero#Gases\\_de\\_Efecto\\_Invernadero\\_.28GEI.29](http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_invernadero#Gases_de_Efecto_Invernadero_.28GEI.29); 2009; Gases de efecto invernadero
9. [http://es.wikipedia.org/wiki/Bonos\\_de\\_carbono](http://es.wikipedia.org/wiki/Bonos_de_carbono); 2009; Bonos de carbono
10. <http://www.cnnexpansion.com/especiales/ideas-verdes/economia/el-cielo-es-el-limite>; 2009; Bonos de carbono en México
11. <http://www.congresoia-ia.iteso.mx/ponencias/ReologiadefAsfaltos.pdf>; 2009; Reología del asfalto